

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA EMBEBIDO Y PROTOTIPO  
FUNCIONAL DE UNA ESTACIÓN TRANSPORTABLE PARA EL MONITOREO  
DE GASES AMBIENTALES**

**PABLO ANDRES MEJIA JARAMILLO  
MANUEL ESTEBAN LATORRE VICTORIA**

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE AUTOMÁTICA Y ELECTRÓNICA  
PROGRAMA DE INGENIERIA MECATRONICA  
SANTIAGO DE CALI  
2014**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA EMBEBIDO Y PROTOTIPO  
FUNCIONAL DE UNA ESTACIÓN TRANSPORTABLE PARA EL MONITOREO  
DE GASES AMBIENTALES**

**PABLO ANDRES MEJIA JARAMILLO  
MANUEL ESTEBAN LATORRE VICTORIA**

**Pasantía de Investigación para optar el título de Ingeniero Mecatrónico**

**Director  
JOHN JAIRO CABRERA LÓPEZ  
Ingeniería Física  
Maestría en Ingeniería con Énfasis en Automática**

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE AUTOMÁTICA Y ELECTRÓNICA  
PROGRAMA DE INGENIERIA MECATRONICA  
SANTIAGO DE CALI  
2014**

**Nota de aceptación:**

**Aprobado por el Comité de Grado  
en cumplimiento de los requisitos  
exigidos por la Universidad  
Autónoma de Occidente para optar  
al título de Ingeniero Mecatrónico.**

**DIEGO FERNANDO ALMARIO  
JURADO**

**JUAN CAMILO ACOSTA  
JURADO**

**Santiago de Cali, Agosto 8 del 2014**

Dedicado a Dios por haberme permitido culminar una etapa muy importante en mi vida. A mi madre Martha por todo el apoyo, la paciencia, los consejos, pero más que nada por su amor. A mi padre Libardo por ser ese ejemplo de profesional íntegro y perseverancia. A mi maestra Sandra Arizabaleta por enseñarme a siempre tener un plan de vida. A mis familiares y amigos que apoyaron mi formación profesional hasta el final.

**Manuel Esteban Latorre Victoria**

Dedicado a Dios por permitirme estar aquí lleno de salud y alegría para terminar con esta etapa de mi vida. A mis padres Clara Inés Jaramillo Angulo y Octavio Mejía Muñoz quienes trabajaron duro para darme esta gran oportunidad de ser un profesional con los valores de formación integral que me han inculcado, además de siempre estar ahí para aconsejarme y brindarme una mano cuando más lo he necesitado. A toda mi familia que siempre me apoyo a lo largo de toda mi carrera y a mis amigos que nunca dejaron de creer en mí.

**Pablo Andrés Mejía Jaramillo**

## **AGRADECIMIENTOS**

Deseamos expresar nuestros más profundos agradecimientos a Dios por darnos la sabiduría, inteligencia y confianza necesaria para realizar este trabajo de grado.

Al ingeniero John Jairo Cabrera López quien nos brindó la oportunidad de realizar este trabajo de investigación, además de compartirnos sus conocimientos en los últimos semestres.

Al ingeniero Jesús Alfonso López por la paciencia y el acompañamiento en todo nuestro proceso de formación profesional.

Especiales agradecimientos a nuestra Universidad Autónoma de Occidente por darnos la oportunidad de implementar este proyecto.

## CONTENIDO

	Pág.
<b>PREFACIO</b>	<b>12</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>13</b>
<b>1. INTRODUCCION</b>	<b>14</b>
<b>2. PROBLEMA DE INVESTIGACION</b>	<b>15</b>
2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
2.2. APORTES	16
<b>3. OBJETIVOS</b>	<b>17</b>
3.1. OBJETIVO GENERAL	19
3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	19
<b>4. MARCO DE REFERENCIA</b>	<b>20</b>
4.1. TÉCNICAS PARA EL MONITOREO DE GASES AMBIENTALES	20
4.1.1. Cromatografía de gases.	21
4.1.2. Espectrometría de masas.	23
4.1.3. Acoplamiento cromatografía de gases-espectrometría de masas.	25
4.1.4. Sensores de gas: Tecnologías.	26
4.1.4.1. Sensores Semiconductores De Oxido Metálico.	27
4.1.4.2. Sensores Electroquímicos.	28
4.2. CIRCUITOS Y SISTEMAS EMBEBIDOS DE SEÑAL MIXTA.	29
4.2.1. Sistema programable en chip: PSoC.	30
4.2.2. Circuitos switched-capacitor: Innovación en sistemas embebidos analógicos.	31
4.3. PLATAFORMAS DE DESARROLLO DE <i>HARDWARE</i> ABIERTO	32
4.3.1. Filosofía Arduino.	33
4.3.1.1. Arduino Ethernet Shield.	35
4.3.2. Plataforma de desarrollo <i>FreeSoC</i> .	36
<b>5. DISEÑO</b>	<b>38</b>
5.1. INTRODUCCIÓN	38
5.2. IDENTIFICACIÓN DE TECNOLOGÍAS	39
5.3. DISEÑO MODULAR DEL MONITOR	40
5.4. DISEÑO DEL SISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL	41
5.4.1. Acondicionamiento de los sensores MOS.	42
5.4.1.1. Medición del sensor resistivo.	47

5.4.2. Acondicionamiento del Sensor electroquímico.	51
5.4.3. TEMA: Tarjeta Electrónica para el Monitoreo Ambiental.	54
5.5. DISEÑO DE LA INTERFAZ DE COMUNICACIONES	55
5.6. DISEÑO DE LA INTERFAZ DE USUARIO	56
5.7. DISEÑO DEL SISTEMA EMBEBIDO DE SEÑAL MIXTA	57
 6. IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS	 60
6.1. PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA EMBEBIDO DE SEÑAL MIXTA	60
6.2. PRUEBA DEL SISTEMA EMBEBIDO DE SEÑAL MIXTA	63
6.3. IMPLEMENTACION DE LA TEMA	66
6.4. DESARROLLO DEL MONITOR DE GASES AMBIENTALES	69
 7. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	 78
 BIBLIOGRAFÍA	 79

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Columna cromatografica de Tsweet	22
Figura 2. Equipo de una cromatografía de gases	23
Figura 3. Funcionamiento de un espectrómetro de masas	24
Figura 4. (A) Sensor electroquímico. (B) Sensor MOS <i>through hole</i> . (C) Sensor MOS SMD. (D) Sensor MOS SMD en plaqueta de acoplamiento <i>through hole</i>	29
Figura 5. Circuito <i>Switched-Capacitor</i> usado en los arreglos Análogos de PSoC	32
Figura 6. Familia de dispositivos Arduino. (Arduino, 2010)	33
Figura 7. Modularidad de Arduino. (Arduino, 2010)	34
Figura 8. Plataformas de desarrollo de Hardware abierto, (A) <i>FreeSoC</i> , (B) <i>Shield</i> de Ethernet Arduino	37
Figura 9. Diagrama de bloques del proceso funcional del monitor	38
Figura 10. Diagrama de bloques general de un monitoreo de gases	39
Figura 11. Diagrama de bloques del monitoreo de gases	41
Figura 12. Símbolo universal de un sensor de gas MOS	43
Figura 13. Polarización de <i>RH</i> con R1 para controlar potencia	44
Figura 14. Circuito de polarización <i>RH</i> con control de alimentación	45
Figura 15. Circuito de polarización de <i>RH</i> para sensores en PB	46
Figura 16. Diagrama de bloques del acondicionamiento de la señal de <i>RS</i>	47



<b>Figura 17. Circuito de acondicionamiento de <i>RS</i></b>	<b>48</b>
<b>Figura 18. Ecuación de divisor de tensión</b>	<b>48</b>
<b>Figura 19. Ecuación para la resistencia sensitiva</b>	<b>48</b>
<b>Figura 20. Circuito de acondicionamiento de la señal del sensor</b>	<b>50</b>
<b>Figura 21. Ecuación para máxima transferencia de potencia en <i>RS</i></b>	<b>51</b>
<b>Figura 22. Circuito de control de tensión</b>	<b>52</b>
<b>Figura 23. Circuito de medición de corriente</b>	<b>53</b>
<b>Figura 24. Circuito de protección al apagado</b>	<b>53</b>
<b>Figura 25. Diagrama de bloques funcional de TEMA</b>	<b>54</b>
<b>Figura 26. Diagrama de bloques del Arduino <i>Ethernet Shield</i></b>	<b>55</b>
<b>Figura 27. <i>Shield</i> LCD Arduino</b>	<b>57</b>
<b>Figura 28. Diagrama de bloques del sistema embebido</b>	<b>59</b>
<b>Figura 29. Esquemático sistema implementado en <i>PSOC Creator</i></b>	<b>60</b>
<b>Figura 30. Multiplexor análogo y ADC delta sigma</b>	<b>61</b>
<b>Figura 31. Módulos de usuario: Configuración del <i>Encoder</i> y Joystick</b>	<b>62</b>
<b>Figura 32. Módulos de usuario de configuración SPI y UART USB</b>	<b>62</b>
<b>Figura 33. Modulo LCD y pines digitales de salida</b>	<b>63</b>
<b>Figura 34. Divisor de tensión de prueba</b>	<b>63</b>
<b>Figura 35. Prueba de linealidad de cada canal de <i>FreeSoc</i></b>	<b>64</b>
<b>Figura 36. Recta promedio de las medias del sistema</b>	<b>66</b>

<b>Figura 37. Esquemático de la tarjeta TEMA en el software</b>	<b>67</b>
<b>Figura 38. Imagen 3D de la tarjeta TEMA en el software</b>	<b>68</b>
<b>Figura 39. Foto de la TEMA implementada</b>	<b>69</b>
<b>Figura 40. Vistas del ensamble en el software CAD del monitor de gases</b>	<b>70</b>
<b>Figura 41. Fotos del monitor de gases ambientales</b>	<b>71</b>
<b>Figura 42. Diseño en software CAD de la cubierta del dispositivo</b>	<b>72</b>
<b>Figura 43. Monitor de gases dentro de su cubierta en el software CAD</b>	<b>73</b>
<b>Figura 44. Implementación del <i>Housing</i></b>	<b>74</b>
<b>Figura 45. Prototipo ensamblado</b>	<b>75</b>
<b>Figura 46. Medidas de comparación en rango bajo de los sensores MOS</b>	<b>76</b>
<b>Figura 47. Medidas de comparación en rango bajo de los sensores MOS</b>	<b>77</b>

## **LISTA DE CUADROS**

	<b>Pág.</b>
<b>Cuadro 1. Plataformas de PSoC con su respectiva CPU</b>	<b>30</b>
<b>Cuadro 2. Temperaturas y potencias de trabajo de los sensores MOS</b>	<b>42</b>
<b>Cuadro 3. Resistencias serie de control de potencia</b>	<b>43</b>
<b>Cuadro 4. Rangos de concentración de los sensores</b>	<b>49</b>
<b>Cuadro 5. Rangos de resistencia de los sensores</b>	<b>49</b>
<b>Cuadro 6. Valores de las rectas, (M) pendiente, (B) intercepto</b>	<b>65</b>

## **PREFACIO**

Esta pasantía de investigación hace parte de un de proyecto profesoral titulado “Diseño e implementación de un sistema transportable para el monitoreo de gases ambientales” el cual es dirigido por los ingenieros John Jairo Cabrera López y Mario Andrés Gandini. En el transcurso de su desarrollo ha contado con aportes de trabajos de estudiantes para su consecución, en este orden de ideas se mencionará los trabajos más representativos de este proyecto y sus correspondientes autores:

Alejandra Mejía: Estación meteorológica, en este trabajo se seleccionaron los transductores para medir los gases seleccionados.

Cesar Romero: Acondicionamiento auto ajustables de señales de baja tensión.

Julián Romero: Realizo las librerías correspondientes a la interfaz de comunicaciones, la cual es integrada y utilizada en este proyecto.

## RESUMEN

Este informe expone el diseño y la implementación de un dispositivo transportable para monitorear gases ambientales. Buscando favorecer desarrollos posteriores para monitores de gases, se optó por diseñar un prototipo modular utilizando plataformas reconfigurables de hardware abierto interconectables.

Entonces, se desarrolló un dispositivo que soporta sensores para gases ambientales tales como: monóxido de carbono (CO), ozono (O<sub>3</sub>), compuestos orgánicos volátiles (VOC), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>); Para esto, una plataforma configurable basada en circuitos de señal mixta, se utilizó para el desarrollo del sistema embebido, la cual permite la interconexión con diferentes capas de tarjetas electrónicas y la integración de varias funciones análogas requeridas.

Este sistema adquiere, procesa y gestiona las señales de los diferentes sensores mencionados; las medidas obtenidas pueden ser desplegadas en una pantalla LCD, almacenadas en una tarjeta de memoria SD y enviadas a la Web a través de Ethernet. El dispositivo propuesto es fácil de transportar y puede operar con una batería; su interfaz de usuario es simple y ofrece lecturas actualizadas e in-situ.

**Palabras Claves:** Sensor de gas, acondicionamiento de señal, circuito de señal mixta, hardware abierto, FreeSoC.

## 1. INTRODUCCION

El creciente interés que hoy por hoy se tiene para obtener datos sobre la calidad del aire de una manera rápida y confiable muestra la necesidad de instrumentos de monitoreo no estacionarios.

Estas tendencias reflejan el diseño y construcción de nuevos instrumentos o sistemas que sean más sensitivos, selectivos, exactos y precisos. Sin embargo, estos sistemas resultan ser aún voluminosos comprometiendo su portabilidad y autonomía.

El presente proyecto pretende el diseño e implementación de un sistema modular integrado para el monitoreo gases tales como monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), ozono (O<sub>3</sub>) y compuestos volátiles orgánicos (VOC).

El sistema se basaría en circuitos de señal mixta y sensores semiconductores, previendo que este sea un instrumento móvil que podría ser utilizado en aplicaciones como el monitoreo de la calidad del aire, emisiones súbitas o fugitivas, en tiempo en línea. Esta última consideración finalmente estaría definida por los resultados de comparación entre este instrumento y el equipo comercial Aeroqual AQM60 teniendo en cuenta el grado de aceptación de precisión definido para cada gas.

## 2. PROBLEMA DE INVESTIGACION

### 2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El estudio del medio ambiente y de sus contaminantes actualmente utiliza técnicas analíticas como la cromatografía y la espectrografía de gases que requieren toma de muestras en el lugar objetivo y transportarlas a laboratorios especializados para realizar los estudios necesarios, este proceso toma tiempo lo cual impide que la información pueda ser recolectada en línea e in situ y aumentan el costo del estudio.

Estos sistemas de monitoreo suelen ser voluminosos, costosos, no son de fácil transporte y no permiten realizar medidas en movimiento. Ya que se requieren de recipientes con el volumen suficiente para contener cierta cantidad de aire como muestra del lugar objetivo, transportar dicho recipiente una vez tomada la muestra desde el lugar objetivo hasta los laboratorios donde se llevan a cabo los estudios con los respectivos equipos, los cuales no dan resultado instantáneos sino que requieren de cierto lapso para entregarlos. Es decir que, estos sistemas no pueden ser instalados para monitorear ambientes remotos o con la cantidad suficiente para el monitoreo de áreas a pequeña escala<sup>1</sup>.

Es importante tener en cuenta que el concepto sujeto al monitoreo de la calidad del aire requiere de normativas ya establecidas por entidades medioambientales que solo abalan protocolos de monitoreo de gases la cromatografía y la espectrografía de gases. Por ende, este proyecto pretende ofrecer un método predictivo de la calidad del aire en un lugar objetivo. En este sentido y basados en la experiencia que se tiene en la Universidad Autónoma de Occidente sobre las tecnologías actuales para el diseño de sistemas embebidos mixtos las cuales se caracterizan por ser de notable desempeño, bajo costo y menor tamaño. ¿Cómo diseñar e implementar un monitor de gases transportable, innovador y económico haciendo uso de las tecnologías actuales para sistemas embebidos y de medición de gases tales como monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), ozono (O<sub>3</sub>) y compuestos volátiles orgánicos (VOC)?

---

<sup>1</sup> TAEHOON, Lee. Testbed for Micro-scale urban air quality monitoring system. [en línea]. En: IEEEExplore, Seoul, Junio – Julio, 2009, p. 191 – 196 [consultado el 20 de Agosto de 2013]. Disponible en internet: [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5260625&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D5260625](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=5260625&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5260625).

## **2.2. APORTES**

El desarrollo de este proyecto aporta al avance de tecnologías de monitoreo y del medio ambiente, poniendo a prueba el uso de la última tecnología desarrollada en sensores de gases ambientales de estado sólido, además de:

- Diseño e implementación de un prototipo basado en circuitos de señal mixta.
- Desarrollo de un monitor de gases ambientales de bajo consumo de potencia que permita a las industrias y a los hogares tener un dispositivo transportable y de mediciones confiables.
- Desarrollo de prototipos multifuncionales como lo es un monitor de gases ambientales de bajo costo y que sean fáciles de adquirir en zonas industriales y residenciales para las empresas y hogares de la ciudad.
- Diseño e implementación de una Tarjeta Electrónica para el Monitoreo Ambiental (TEMA) capaz de soportar cuatro sensores de gas con tecnología MOS y uno electroquímico.



### 3. JUSTIFICACIÓN

El incremento súbito de emisiones de gases contaminantes al aire en un área dada, causados por eventos aleatorios (escape de sustancias tóxicas, quemas que incluyan compuestos químicos, etc.), pueden poner en peligro la salud de la población local sin mencionar otros organismos vivos y ecosistemas. Por lo tanto, el monitoreo regular de estos gases es un deber por parte de entidades gubernamentales, analistas e investigadores<sup>2</sup>.

En la actualidad se cuenta con monitores de gases contaminantes que pueden ser estacionarios o transportables. Estos últimos actualmente comienzan a ser más populares debidamente permiten medir las concentraciones en línea y en el sitio de la contaminación<sup>3</sup>. Esta tendencia resulta en el diseño e implementación de nuevos monitores que sean más sensibles, selectivos y exactos<sup>4</sup>. Estos diseños están orientados hacia la combinación de varios instrumentos en un sistema y formar un sistema o monitor multi-sensor, controlado por un microprocesador capaz de desplegar o enviar a una estación central los datos obtenidos.

El propósito de los nuevos sistemas móviles para el monitoreo de contaminantes es que estos sean económicos, confiables y no que requieran de rutinas frecuentes de mantenimiento tal como muestran los desarrollos actuales de Katulski, Volgyesi, Nadas, Koutsoukos y Ledeczki. Estos desarrollos han mostrado que el estado del arte de los sensores semiconductores para gases, pueden ser utilizados en diferentes aplicaciones, como por ejemplo el monitoreo de la calidad del aire.

Por estas razones, se hace necesario trabajar en el diseño de sistemas móviles para el monitoreo de la calidad del aire, tal que este, satisfaga las actuales

---

<sup>2</sup> WHO air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide [en línea]. Geneva: World Health Organization, 2005 [consultado 7 de Agosto de 2013]. Disponible en Internet: [http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_eng.pdf](http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf).

<sup>3</sup> SYLWIA, k. Monitoring VOCs in atmospheric air I. On-line gas analyzers [en línea]. Gdansk, 2010 [consultado 7 de Agosto de 2013]. Disponible en Internet: [http://www.researchgate.net/publication/222185581\\_Monitoring\\_VOCs\\_in\\_atmospheric\\_air\\_I\\_On-line\\_gas\\_analyzers](http://www.researchgate.net/publication/222185581_Monitoring_VOCs_in_atmospheric_air_I_On-line_gas_analyzers).

<sup>4</sup> WARDENCKI, Waldemar. The estate of art in the field of Non-Stationary instruments for the determination and monitoring of atmospheric pollutants [en línea]. Gdansk, 2008 [consultado 7 de Agosto de 2013]. Disponible en Internet: [http://www.researchgate.net/publication/239243469\\_The\\_State\\_of\\_the\\_Art\\_in\\_the\\_Field\\_of\\_Non-Stationary\\_Instruments\\_for\\_the\\_Determination\\_and\\_Monitoring\\_of\\_Atmospheric\\_Pollutants-](http://www.researchgate.net/publication/239243469_The_State_of_the_Art_in_the_Field_of_Non-Stationary_Instruments_for_the_Determination_and_Monitoring_of_Atmospheric_Pollutants-).

necesidades de monitoreo, apoye y fomenta investigaciones, y análisis de la calidad del aire. Por ejemplo, un sistema de este tipo permitiría validar y continuar con las investigaciones de proyectos tales como “determinación de la dinámica de exposición de contaminantes atmosféricos en la Universidad Autónoma de Occidente y estimación del riesgo sanitario asociado” desarrollado en la UAO y “diseño e implementación de un sistema transportable para el monitoreo de gases ambientales” que actualmente se lleva a cabo en la UAO.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1. OBJETIVO GENERAL**

Diseñar e implementar un sistema transportable para el monitoreo de gases ambientales, tales como monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), ozono (O<sub>3</sub>) y compuestos volátiles orgánicos (VOC).

### **4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Diseñar circuitos electrónicos para el acondicionamiento de las señales de sensores electroquímicos seleccionados.
- Diseñar circuitos electrónicos para el acondicionamiento de las señales de sensores *MOS* seleccionados.
- Implementar los circuitos diseñados en tarjetas PCB.
- Integrar los diseños electrónicos en una plataforma modular.
- Desarrollar un sistema embebido para el monitor de gases implementado.
- Elaborar y diseñar un protocolo de ajuste para el monitor de gases

## 5. MARCO DE REFERENCIA

### 5.1. TÉCNICAS PARA EL MONITOREO DE GASES AMBIENTALES

Los instrumentos de monitoreo de contaminantes del aire pueden clasificarse de acuerdo a varios criterios. Por ejemplo, de acuerdo al método utilizado para la detección del contaminante pueden clasificarse como químicos o fisicoquímicos. De acuerdo a su localización donde la medida tendrá lugar pueden ser estacionarios (en laboratorios) o móviles (in-situ o en campo). Estos últimos tienen la ventaja de permitir una rápida evaluación y respuesta a un problema ambiental particular, y no requieren del acceso a laboratorios sofisticados. La literatura científica describe un gran número de monitores móviles recientemente desarrollados, que pueden ser utilizados para la determinación de diferentes contaminantes en el aire atmosférico.

En Wardencki<sup>5</sup> se presenta un resumen de los diferentes métodos de medida usados en monitores no estacionarios. Varios de estos monitores aplican métodos bien conocidos como la cromatografía de gases (GC)<sup>6</sup> y espectrometría de masas (MS)<sup>7</sup>, y otros con mayor selectividad utilizan nuevas técnicas ópticas<sup>8</sup>. Así mismo, también se encuentran este tipo de desarrollos pero utilizando métodos químicos<sup>9</sup>, que requieren posterior tratamiento y análisis de las muestras en un laboratorio químico. Sin embargo, estos monitores, a pesar de ser móviles, se caracterizan

---

<sup>5</sup> WARDENCKI, Waldemar. The estate of art in the field of Non-Stationary instruments for the determination and monitoring of atmospheric pollutants [en línea]. Gdansk, 2008 [consultado 7 de Agosto de 2013]. Disponible en Internet: [http://www.researchgate.net/publication/239243469\\_The\\_State\\_of\\_the\\_Art\\_in\\_the\\_Field\\_of\\_Non-Stationary\\_Instruments\\_for\\_the\\_Determination\\_and\\_Monitoring\\_of\\_Atmospheric\\_Pollutants-](http://www.researchgate.net/publication/239243469_The_State_of_the_Art_in_the_Field_of_Non-Stationary_Instruments_for_the_Determination_and_Monitoring_of_Atmospheric_Pollutants-)

<sup>6</sup> NOHMI, Takashi. Detection of Carbon Dioxide in Urban Search and Rescue as an Application for Miniaturized Mass Spectrometers [en línea]. Tokio: Mass Spectrom, 2003 [consultado 7 de Agosto de 2013]. Disponible en Internet: <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=14767306>.

<sup>7</sup> ECKENRODE, B. Environmental and Forensic Applications of Field-Portable GC-MS [en línea]. Florida: Mass Spectrom, 2001 [consultado 13 de Agosto de 2013]. Disponible en Internet: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1044030501002513>.

<sup>8</sup> HARMON, Russell. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy an Emerging Chemical Sensor Technology for Real-Time, Field-Portable, Geochemical, Mineralogical, and Environmental Applications [en línea]. Florida, 2006 [consultado 13 de Agosto de 2013]. Disponible en Internet: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883292706000424>.

<sup>9</sup> WATANABE, M. Simultaneous Determination of Atmospheric Sulfur and Nitrogen Oxides Using a Battery-Operated Portable Filter Pack Sampler [en línea]. En: Environmental Monitoring, Chiba. 2006. P. 167-173. [consultado 20 de Agosto de 2013]. Disponible en Internet: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16395475>.

por ser voluminosos y pesados, además no pueden realizar medidas en movimiento<sup>10</sup>.

**5.1.1. Cromatografía de gases.** La cromatografía se entiende como un método físico de separación de componentes dentro de una solución o sustancia en la cual es posible diferenciar dos fases, una estacionaria y otra dinámica. Los componentes de la solución se separan por sus diferentes tasas de migración<sup>11</sup>.

La cromatografía se clasifica por su utilidad y en base al material que se utilice como solvente para separar los solutos. De acuerdo a su utilidad la cromatografía puede ser: analítica, la cual determina los químicos presentes en una mezcla y en que concentración; y preparativa, la cual purifica grandes cantidades de químicos.

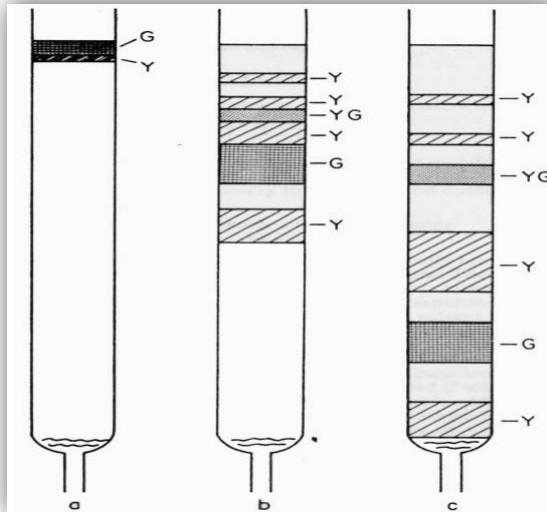
Mikhail Tswett, botánico ruso que en 1906 realizó la primera técnica cromatográfica donde utilizó un tubo de vidrio en el cual introdujo azúcar en polvo para producir una columna de una altura deseada. Posteriormente, extrajo pigmentos coloreados de las hojas los árboles y los colocó en éter de petróleo (solvente) y agregó un poco de la solución dentro de la columna. Cuando toda la solución había pasado a través de la columna se formó una estrecha zona inicial bajo la capa inicial del adsorbente como se observa en la Figura 1. Columna cromatográfica de TsweetDespués agregó más solvente y aplicó presión en la parte superior de la columna. Mientras el solvente iba pasando a través de la columna, los pigmentos se iban separando individualmente; Figura 1. (b) y (c).

---

<sup>10</sup> KATULSKI, Ryszard. Mobile Monitoring System for Gaseous Air Pollution [en línea]. En: Polska Akademia Nuak, Gdansk. 2009. p. 677-682 [consultado 21 de Agosto de 2013]. Disponible en Internet: [http://www.metrology.pg.gda.pl/full/2009/M&MS\\_2009\\_677.pdf](http://www.metrology.pg.gda.pl/full/2009/M&MS_2009_677.pdf).

<sup>11</sup> OLGUIN, Laura y RODRIGUEZ, Hector. Metodos en Biotecnologia: Cromatogtfia de gases [en línea]. En: Instituto de biotecnologia, Mexico DF. Junio, 2004. P. 1-4. [consultado 10 de Mayo de 2014]. Disponible en Internet: [www.ibt.unam.mx/computo/pdfs/met/cromatografia\\_de\\_gases.pdf](http://www.ibt.unam.mx/computo/pdfs/met/cromatografia_de_gases.pdf).

### Figura 1. Columna cromatográfica de Tsweet

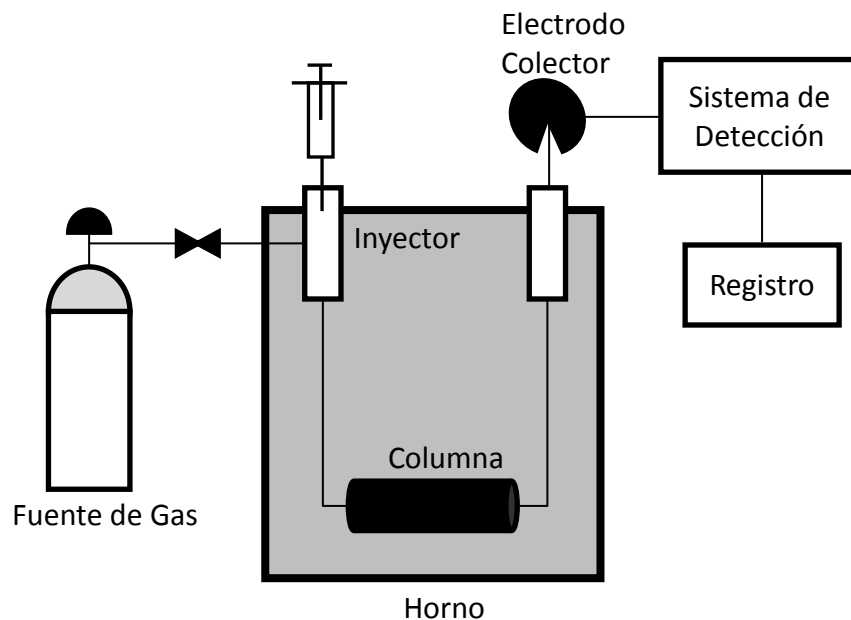


Esta técnica de separación de componentes no solo es posible realizarla con soluciones líquidas. La GC es utilizada actualmente para dar un diagnóstico preciso de los componentes que compone un gas.

Para realizar una separación mediante GC, se inyecta la muestra a separar en una corriente de gas inerte a elevada temperatura; esta corriente de gas, cruza por una columna cromatográfica que separa los componentes de la mezcla por medio de un mecanismo de partición (cromatografía gas líquido), de adsorción (cromatografía gas solido) o, en muchos casos, por medio de un cruce entre ambos. Los componentes separados surgirán de la columna a intervalos discretos y pasaran a través de algún sistema de detección adecuado, o bien serán dirigidos hacia un dispositivo de recogida de muestras.

El esquema general de un cromatógrafo de gases se muestra en la Figura 2. En donde se pueden observar los componentes fundamentales del equipo para realizar una GC. Un cromatógrafo de gases se compone básicamente de una fuente de gas inerte para regular la velocidad del proceso, un sistema de inyección por donde entrara el gas objetivo, un horno en donde se encuentra la columna cromatográfica, un sistema de detección y un sistema de registro de datos.

**Figura 2. Equipo de una cromatografía de gases**



**5.1.2. Espectrometría de masas.** La técnica que permite analizar la composición de diferentes elementos químicos e isótopos atómicos es conocida como espectrometría de masas<sup>12</sup>. La MS es una técnica analítica muy completa la cual ha sido utilizada recientemente en no sólo en investigación, sino también en análisis de rutina de los procesos industriales, en control de calidad, entre otros.

La Figura 3. Muestra el funcionamiento de un espectrómetro de masas, dentro de este se ionizan las moléculas de la muestra. La ionización de las moléculas se realiza mediante el bombardeo de iones con una cierta energía, esto genera un impacto electrónico lo cual provoca una emisión estimulada de electrones en las moléculas de la muestra y así ionizarlas<sup>13</sup>. En la figura se denota (M) como las moléculas de la muestra y ( $m^+$ ) como las moléculas ionizadas.

<sup>12</sup> PRIMO, Eduardo. Química Organica Basica y Aplicada. Ed. Barcelona : Reverté, 1995. P. 797-807.

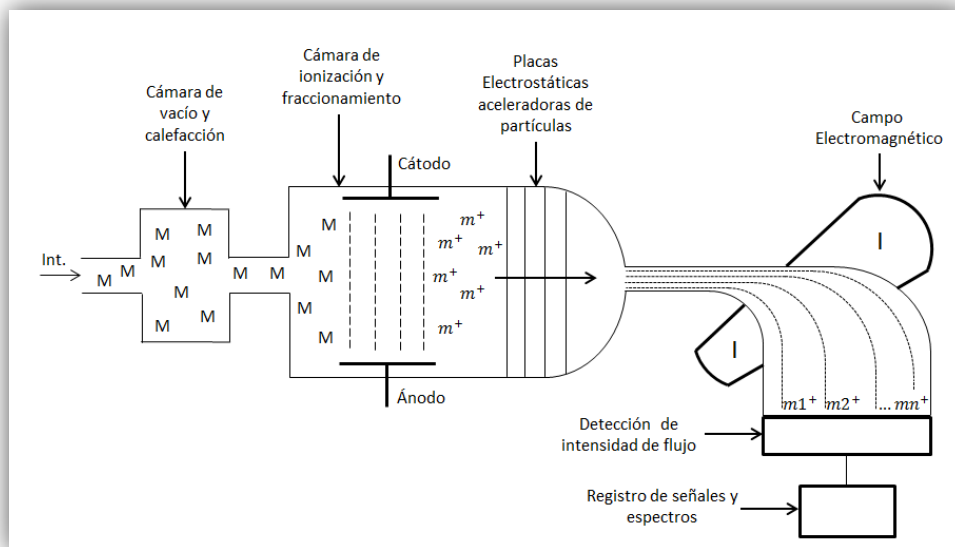
<sup>13</sup> GUTIERREZ, M. y DROGUET, M. La Cromatografía de Gases y la Espectrometría de Masas: Identificación de Compuestos Causantes de Mal Olor [en línea]. En: Boletín Intexter UPC. Catalunya, 2002. [consultado 10 de Mayo de 2014]. Disponible en Internet: <https://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/2733/1/5CROMGASES.pdf>.

El impacto electrónico también forma iones fragmento debido a la descomposición de los iones moleculares con exceso de energía. El tipo y la proporción relativa de cada uno de estos fragmentos es característico de las moléculas analizadas. Una vez ionizadas las moléculas, se aceleran por medio de unas placas electrostáticas que las conducen hacia una cámara atravesada por un campo electromagnético.

La velocidad alcanzada por cada ión será dependiente de su masa, por esto, las moléculas ionizadas y los fragmentos generaran radios diferentes según se observa en la figura. La detección consecutiva de los iones formados a partir de las moléculas de la muestra, produce el espectro de masas de la muestra, que es diferente para cada compuesto químico y es una identificación prácticamente inequívoca de la muestra analizada.

El espectro de masas posteriormente es registrado y comparado con una colección de espectros para identificar o estudiar la naturaleza de origen de la muestra<sup>14</sup>.

**Figura 3. Funcionamiento de un espectrómetro de masas**



<sup>14</sup>PRIMO,Eduardo. Química Organica Basica y Aplicada. Ed. Barcelona : Reverté,1995. P. 797-807.



Esta capacidad de identificación de forma prácticamente inequívoca y la capacidad de permitir medir la concentración de las sustancias, son unas de las principales cualidades que hacen a este método de monitoreo universal.

Los espectrómetros de masas habitualmente detectan concentraciones del orden de Partes Por Millón (PPM) o Partes Por Billón (PPB), también proporcionan información estructural de la molécula analizada.

Es posible realizar un espectro en décimas de segundo, por lo que puede modificarse para obtener información en línea sobre la composición de una mezcla de gases<sup>15</sup>.

**5.1.3. Acoplamiento cromatografía de gases-espectrometría de masas.** La GC tiene la característica de conseguir separar mezclas muy complejas. Pero una vez separados y cuantificados cada uno de los componentes de una muestra, lo único que se dispone para la identificación de cada uno de ellos es el tiempo de retención de los correspondientes picos cromatográficos. Este tiempo no es suficiente para una identificación inequívoca, sobre todo cuando se analizan muestras con un alto número de componentes, como es frecuente en GC.

Por otra parte, la MS puede identificar cualquier sustancia pura de manera muy precisa y casi inequívoca, pero no es capaz de identificar los componentes individuales de una muestra con muchos componentes sin una previa separación de estos, debido a que el espectro de una muestra de estas presenta una gran complejidad por la superposición de los espectros particulares de cada componente.

Por lo tanto, la agrupación estas dos técnicas da lugar a una técnica combinada conocida como GC-MS que permite la separación e identificación de mezclas complejas. Ya que estas dos técnicas trabajan en fase gaseosa y necesitan una pequeña cantidad de muestra para su análisis, por lo general son muy compatibles. La única desventaja de esta técnica es a la hora de realizar su acoplamiento en el que el efluente que emerge de la columna cromatográfica sale

---

<sup>15</sup> GUTIERREZ, M. y DROGUET, M. La Cromatografía de Gases y la Espectrometría de Masas: Identificación de Compuestos Causantes de Mal Olor [en línea]. En: Boletín Intexter UPC. Catalunya, 2002. [consultado 10 de Mayo de 2014]. Disponible en Internet: <https://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/2733/1/5CROMGASES.pdf>.

a presión atmosférica y debe inyectarse en el interior del espectrómetro de masas que trabaja en vacío. Sin embargo, el acoplamiento resulta sencillo cuando se utiliza la cromatografía de gases capilar, que es el caso más común<sup>16</sup>.

En resumen, una mezcla de compuestos inyectada en el cromatógrafo de gases se separa en la columna cromatográfica obteniendo la elución sucesiva de los componentes individuales aislados que pasan inmediatamente al espectrómetro de masas. Cada uno de estos componentes se registra en forma de pico cromatográfico y se identifica mediante su respectivo espectro de masas.

En este proceso, el espectrómetro de masas proporciona los espectros y actúa como detector cromatográfico al registrar la corriente iónica total generada en la fuente iónica, cuya representación gráfica es llamada TIC (*total ion current*). La corriente iónica generada por todos los iones da lugar a un pico normal cuya área es proporcional a la concentración del compuesto detectado.

En el caso de mezclas complejas, el TIC obtenido puede presentar muchos picos, algunos de ellos muy próximos, lo cual resulta difícil su identificación rápida y fiable de algún compuesto de interés. Cuando se desea explícitamente localizar la presencia de uno o varios compuestos determinados, de espectro conocido, con la mayor rapidez o con la máxima sensibilidad posible se recurre a la técnica de detección SIR (*selected ion recording*). En esta técnica se detectan solamente algunos compuestos de interés, en lugar de trabajar con el TIC completo. De esta forma, se aumenta la selectividad del método y se reducen las interferencias<sup>17</sup>.

**5.1.4. Sensores de gas: Tecnologías.** Como se ha mencionado anteriormente, las técnicas para el monitoreo de gases como GC, MS, y GC-MS son las utilizadas gracias a su confiabilidad y fidelidad. Es fácil identificar que el principal elemento sensible es la columna cromatográfica en el caso de GC y el detector de velocidad de las partículas ionizadas de gas en el caso de MS.

---

<sup>16</sup> POLA, Luisa. Servicios Centrales de Apoyo a la Investigación [en línea]. Málaga, 2011 [consultado 2 de Marzo de 2014]. Disponible en Internet: <http://www.scai.uma.es/servicios/aqcm/ems/ems.html>.

<sup>17</sup> GUTIERREZ, M. y DROGUET, M. La Cromatografía de Gases y la Espectrometría de Masas: Identificación de Compuestos Causantes de Mal Olor [en línea]. En: Boletín Intexter UPC. Catalunya, 2002. [consultado 10 de Mayo de 2014]. Disponible en Internet: <https://upcommons.upc.edu/revistes/bitstream/2099/2733/1/5CROMGASES.pdf>.

Sin embargo, gracias a los avances tecnológicos en esta área, actualmente se pueden encontrar otros tipos de sensores para una gran gama de gases ambientales con diferentes funcionamientos, tamaños y precios. Entre estos se pueden encontrar sensores con tecnología *pellistor*, infrarrojos, electroquímicos, semiconductores de óxido metálico (MOS), entre otros.

*SGX Sensortech* es una compañía del Reino Unido la cual se encarga de la manufactura de los sensores de gas que se mencionarán a continuación.

**5.1.4.1. Sensores Semiconductores De Oxido Metálico.** Un sensor de gas MOS utiliza tecnología MEMS (Sistemas micro-electromecánicos), que combina una capa sensible de nano-partículas con un calefactor.

La capa sensible se compone de un óxido de metal, generalmente de dióxido de estaño, la cual es calentada por un calefactor. Cuando las partículas químicas del gas objetivo son absorbidas en la superficie sensible, su conductividad eléctrica cambia localmente, lo cual conduce a un cambio en su resistencia eléctrica<sup>18</sup>.

Este tipo de sensores son más complejos que otros sensores ya que combinan efectos térmicos, químicos y eléctricos. Las hojas de datos de estos sensores indican que la capa sensible de los sensores MOS son capas de medir la concentración de gases en PPM lo cual los hace adecuados para aplicaciones medioambientales.

En la familia de sensores MOS se pueden encontrar en el mercado diferentes tipos de encapsulado. Para este proyecto en específico se usaron dos tipos de encapsulado. En la

Figura 4. (B) se muestra un sensor de tecnología MOS *through hole*. La

---

<sup>18</sup> Frequently Asked Questions for MiCS Gas Sensors [en línea]. California: SGX Sensortech, 2005 [consultado 18 de Marzo de 2013]. Disponible en Internet: [http://airqualityegg.wikispaces.com/file/view/mics\\_an2+-+MICS+FAQ.pdf](http://airqualityegg.wikispaces.com/file/view/mics_an2+-+MICS+FAQ.pdf).

Figura 4. (C) muestra un sensor MOS de montaje superficial (SMD).

**5.1.4.2. Sensores Electroquímicos.** Los sensores de gas electroquímicos presentan un funcionamiento diferente a los sensores MOS. Los sensores electroquímicos son sometidos a una reacción química con el gas a medir, produciendo una corriente la cual es proporcional a la concentración de gas presente.

Este tipo de sensores se componen de un electrodo de detección, un contraelectrodo y un electrodo de referencia. El electrodo de detección se encuentra conectado a una membrana porosa e impermeable a un líquido electrolítico. Cuando el gas se propaga hacia el sensor a través de una membrana hasta llegar al electrodo de detección se produce una reacción electroquímica: una oxidación o una reducción, según el tipo de gas. Por ejemplo, el CO se oxida y se forma dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), y el oxígeno (O) puede reducirse a agua (H<sub>2</sub>O).

En una reacción por oxidación, se produce un flujo de electrones desde el electrodo de detección hacia el contraelectrodo a través del circuito exterior de acondicionamiento. Por otro lado, en una reacción por reducción, el flujo de electrones toma el camino inverso, es decir, desde el contraelectrodo hacia el electrodo de detección.

Este flujo de electrones produce una corriente eléctrica proporcional a la concentración de gas. El acondicionamiento electrónico del sensor amplifica esta corriente y clasifican el resultado según la calibración de la unidad<sup>19</sup>.

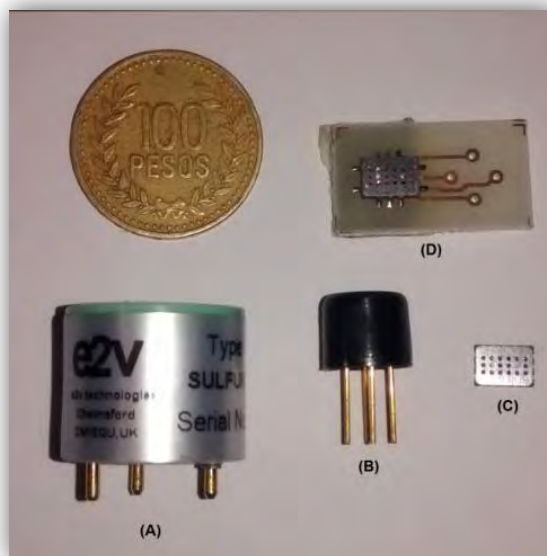
Al igual que los sensores MOS, estos miden la concentración de gas en PPM lo cual los hace útil para aplicaciones como la expuesta en este proyecto. Se utilizara un sensor electroquimico el cual puede observarse en la

---

<sup>19</sup> AHMADI, M. y JULLIEN, G. Current Mirror Based Potentiostats for Three Electrode Amperometric Electrochemical Sensors [en línea]. En: IEEE Circuit and Systems Society. California, 2009 [consultado 18 de Enero de 2013]. [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4629303&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D4629303](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4629303&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D4629303).

Figura 4. (A) el cual se encargara de sensar  $SO_2$ .

Figura 4. (A) Sensor electroquímico. (B) Sensor MOS *through hole*. (C) Sensor MOS SMD. (D) Sensor MOS SMD en plaqueta de acoplamiento *through hole*



## 5.2. CIRCUITOS Y SISTEMAS EMBEBIDOS DE SEÑAL MIXTA

Un circuito de señal de mixta es un sistema integrado que contiene circuitos analógicos y digitales. Este tipo de tecnología es compleja debido a que probar el correcto funcionamiento del sistema es todo un desafío, porque a menudo debe realizarse la comprobación de uno en uno, sin embargo, hoy en día se están diseñando nuevos circuitos integrados y técnicas de diseño análogo que combinadas pueden ser usadas para alcance de altas velocidades de procesamiento análogo, estos desarrollos modernos de circuitos de señal mixta

poseen excelentes características como alta linealidad excelente relación señal/ruido, amplio ancho de banda, bajo consumo de potencia entre otras<sup>20</sup>.

El diseño analógico es desde luego una “magia negra” y combinarla con la parte digital supone un proceso muy complejo en diseños avanzados de señal mixta<sup>21</sup>. Un factor importante que ha facilitado y acelerado el proceso de desarrollo es la creciente sofisticación del flujo de diseño de señal mixta mediante herramientas de Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) que permiten diseñar y simular electrónica analógica y digital en diseños de señal mixta mientras se ejecuta código de programación de forma simultánea.

**5.2.1. Sistema programable en chip: PSoC.** La familia PSoC (*Programmable System on Chip*) de la compañía *Cypress Semiconductor*, son dispositivos con varios arreglos de señal mixta y un microcontrolador en el mismo chip. Un PSoC incluye bloques configurables de circuitos analógicos y lógica digital, así como interconexiones programables. Esta arquitectura permite al usuario crear configuraciones personalizadas con periféricos hasta alcanzar los requerimientos de cada aplicación individual. Adicionalmente cuenta con una CPU rápida, memoria Flash de programa, memoria SRAM de datos y pines E/S configurables. PSoC en comparación con otras familias de uC suele ser de mayor versatilidad. Hoy en día existen 4 plataformas PSoC que diferencian en el tipo de procesador embebido<sup>22</sup>.

**Cuadro 1. Plataformas de PSoC con su respectiva CPU**

Plataforma PSoC	CPU
PSoC 1 (CY8C2xxxx)	M8C 8bits
PSoC 3 (CY8C3xxxx)	8051 8 bits
PSoC 4 (CY8C4xxxx)	Cortex M0 32 bits

---

<sup>20</sup> CABRERA-LOPEZ, John y VELASCO, J. Diseño de Filtros Analógicos para Alta frecuencia Usando PSoC o FPAAs. En: IBERCHIP XIV, Mexico DF. 2008.p.399-401 [consultado 14 de marzo del 2013].

<sup>21</sup> YORK, Richard. Proceso digital embebido en diseños analógicos y de señal mixta [En línea]. Madrid: convertronic, 2013.[consultado 20 de junio de 2014]. Disponible en internet: [www.convertronic.net/Diseno/2013-12-05-09-08-33.html](http://www.convertronic.net/Diseno/2013-12-05-09-08-33.html).

<sup>22</sup> CABRERA- LOPEZ, John. Diseño de un Microsistema para el Procesamiento de Ondas. [Informe]. En: Revista colombiana de física, Santiago de Cali. 2009. p.101-103 [consultado 14 de marzo del 2013].

PSoC 5 (CY8C5xxxx)	Cortex M3 32 bits
--------------------	-------------------

La compañía Cypress ha desarrollado entornos de diseño integrado para la configuración, diseño y programación de sus diferentes plataformas PSoC. En su primer proyecto PSoC 1 desarrollaron el IDE *PSoC Designer* © como software de programación. Aunque este software IDE es muy confiable y funciona perfectamente, Cypress decidió desarrollar otro IDE más amigable con el usuario llamado *PSoC Creator* ©. Este pretende programar los dispositivos de PSoC 3, 4 y 5 respectivamente.

**5.2.2. Circuitos switched-capacitor: Innovación en sistemas embebidos analógicos.** Por otro lado, PSoC incluye algo innovador en sus diseños embebidos de sistemas análogos, los famosos circuitos *Switched-Capacitor* (SC) los cuales son muy utilizados en circuitos análogos programables o FPAAs. Un circuito SC simula un circuito análogo continuo<sup>23</sup>. En los circuitos con tecnología SC, la tensión de entrada es muestreada abriendo y cerrando un interruptor que conecta la entrada a un capacitor inicial como se muestra en la

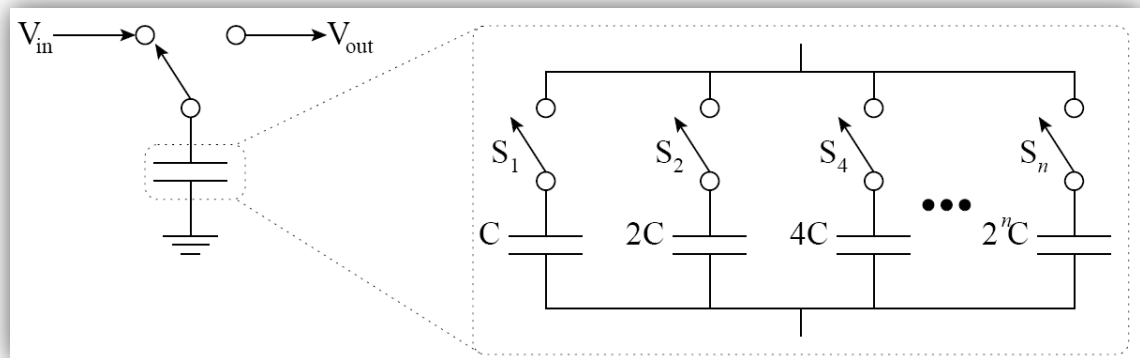
**Figura 5.** Los interruptores y capacitores forman un tipo de registro análogo y la ruta de la señal análoga a través del sistema esta particionada por estos registros. Los elementos para el procesamiento de datos generalmente son amplificadores operacionales y los mencionados registros análogos que sintetizan una resistencia lineal cuyo valor está determinado por la velocidad de muestreo de los interruptores y el valor del capacitor.

---

<sup>23</sup> ALLEN, P y SÁNCHEZ, Sinencio. Switched Capacitor Circuits. New York: Van Nostrand Reinhold company Inc, 1984. p.180-194.

La síntesis de esta resistencia lineal obtenida a partir de los circuitos SC, da a los sistemas análogos de PSoC gran flexibilidad en comparación con los tradicionales circuitos integrados análogos. Sin embargo, los interruptores y capacitores pueden introducir ruido y no linealidades en el sistema diseñado, además, el ancho de banda de operación está limitado por la velocidad de muestreo de los interruptores<sup>24</sup>.

**Figura 5. Circuito *Switched-Capacitor* usado en los arreglos Análogos de PSoC**



### 5.3. PLATAFORMAS DE DESARROLLO DE *HARDWARE* ABIERTO

<sup>24</sup> MARSH, D. Programmable Analogue ICs Challenge Spice and Breadboard Design. Atlanta: EDN Europa, 2001.p.135



**5.3.1. Filosofía Arduino.** Plataforma de electrónica abierta para la creación de prototipos basada en software y hardware fácil de usar<sup>25</sup>. Es la definición que el portal web de Arduino ofrece. Sin duda alguna es una de las plataformas electrónicas más económicas y fáciles de utilizar.

Actualmente esta plataforma de desarrollo ha ayudado a estudiantes de tecnologías o artistas a realizar sus proyectos a una escala pequeña, con bajo capital y sin demasiados conocimientos de electrónica.

El profesor italiano Massimo Banzi fue uno de los fundadores del proyecto Arduino en el 2005. El cual tenía el objetivo de crear una plataforma de desarrollo que utilizara un uC de bajo costo y de reducido tamaño. Desde este año se han desarrollado nuevos productos, siempre siendo fiel a la filosofía de bajo costo y facilidad de uso. Realizaron tarjetas electrónicas de hardware abierto con diferentes propósitos.

En la actualidad Arduino cuenta con una tienda virtual donde se pueden encontrar una gran gama de productos (Figura 6). Se pueden encontrar *Boards* de diferentes tamaños, *Shields*, Kits o Accesorios. Básicamente es posible encontrar un producto específico para una aplicación específica.

**Figura 6. Familia de dispositivos Arduino.**

---

<sup>25</sup> What Arduino can do [En línea]. Torino:Arduino,2010 [consultado 13 de Agosto de 2013]Disponible en Internet: <http://www.arduino.cc/es/>.



Otro aspecto importante que Arduino ha incorporado en sus diseños es su modularidad (Figura 7). Esto es lo que le ha generado tanta popularidad a Arduino. Poder agregar o quitar hardware como si fueran unos bloques LEGO agiliza y facilita su utilización.

**Figura 7. Modularidad de Arduino.**



Arduino cuenta con una línea de productos denominados *Shields* o escudos. Los *shields* son placas de Arduino modulares que cumplen con una aplicación específica. Una característica de estos *shields* es que necesitan un uC que gestione las señales y alimentación para que esté pueda realizar su aplicación correctamente. Actualmente Arduino cuenta con un incontable número de *shields*. Entre los más utilizados se destacan los *shields* GSM, Wifi, USB, Drivers para motores, Ethernet, Memorias SD, entre otros.

**5.3.1.1. Arduino Ethernet Shield.** Esta placa de electrónica abierta permite a una plataforma de desarrollo conectarse a internet (Figura 8. (B).). Se basa el chip de Ethernet *Wiznet W5100*. Este chip ofrece una conexión a red IP. El Ethernet *shield* como se puede observar en la Figura 7 posee los conectores estándar que ofrece una placa de Arduino por ambos lados de la placa. Esta característica es importante ya que mantiene la disposición de pines intacta y permite que otro *shield* pueda ser apilado en la parte superior<sup>26</sup>.

El *shield* cuenta con una conexión estándar RJ 45 con un transformador lineal de alimentación. Consta de una ranura para tarjetas *micro-SD*, que se puede utilizar para almacenar archivos, datos o programas. Incluye un control de reseteo para asegurar que el módulo *W5100* se restablezca adecuadamente al encenderlo. El

---

<sup>26</sup> What Arduino can do [En línea]. Torino:Arduino,2010 [consultado 13 de Agosto de 2013]Disponible en Internet: <http://www.arduino.cc/es/>.

uC que se comunica con el *W5100* y la tarjeta SD por el mismo bus SPI, por lo cual es no posible utilizar el *W5100* y la tarjeta SD a la vez.

Es una tarjeta sencilla de asimilar y cuenta con sus respectivos LEDs de información como el indicador de conexión *Full Dúplex* (FULLD), el indicador de recepción (RX) y transmisión (TX) de datos, el indicador de alimentación, entre otros.

**5.3.2. Plataforma de desarrollo *FreeSoC*.** Muchas personas en la actualidad inician su introducción a sistemas embebidos con plataformas de desarrollo como Arduino por las características anteriormente mencionadas pero básicamente por su facilidad de uso. Desde el 2005 que se creó el proyecto Arduino se ha desarrollado muchos proyectos e investigaciones que en la actualidad han convertido a Arduino en casi un estándar en plataformas de desarrollo electrónico.

Sin embargo, estas plataformas han sido diseñadas para un aprendizaje académico, con lo cual existen algunas limitaciones cuando se quieren diseñar proyectos de altas prestaciones. Por ejemplo la falta de flexibilidad que ofrece la plataforma, el ancho de banda en comunicaciones es muy pobre, las entradas y salidas analógicas son muy limitadas, entre otros.

Por otra parte, PSoC ofrece esta versatilidad y flexibilidad en sus dispositivos de sistemas embebidos de señal mixta que Arduino carece. Aunque *Cypress* ha realizado un buen trabajo en el desarrollo de sus dispositivos, se puede decir que es una tecnología nueva que pocas personas conocen, y por ende no hay mucho desarrollo hasta ahora como el que ya tiene Arduino.

Es por esto que Jon Moeller, estudiante de maestría en la Universidad de Texas, creo una plataforma de *hardware* abierto para el “el mejor microcontrolador del mundo: PSoC5”<sup>27</sup>. Moeller desarrollo una board o con la filosofía modular de Arduino y le incorporo un chip de PSoC5 de bajo consumo al que le llamo *FreeSoC*. Con esto creo una plataforma universal muy versátil y flexible, con características mucho mejores de las que tiene cualquier plataforma de Arduino en la actualidad.

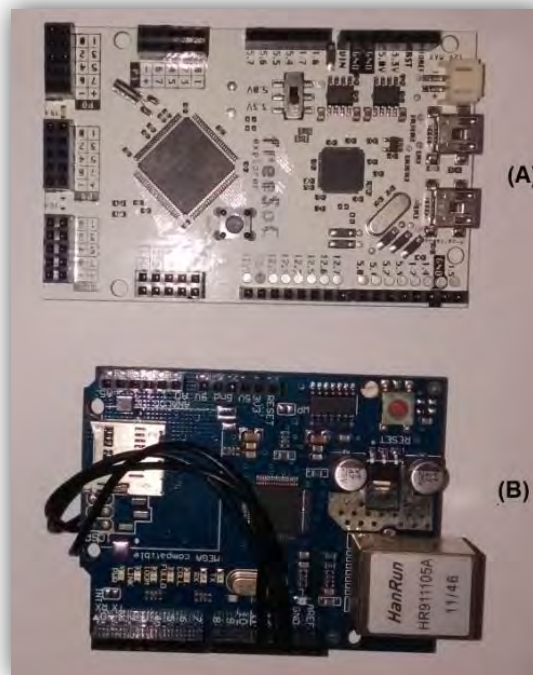
---

<sup>27</sup> MOELLER, Jon. *freeSoC* [En línea]. Brazos. Kickstarter, 2012 [consultado 12 de Mayo de 2014] Disponible en internet: <https://www.kickstarter.com/projects/18182218/freesoc-and-freesoc-mini>.

FreeSoC convirtió las limitaciones de Arduino en inconvenientes del pasado. Al tener un PSoC 5 como microcontrolador, *FreeSoC* adquirió características como 60 pines de propósito general de E/S mixta, un procesador *Cortex M3* de 32 bits, una gran cantidad de módulos análogos y digitales como ADCs, Multiplexores, DACs, Comparadores, PLDs, diferentes protocolos de comunicación, RTC, DMA, entre muchos otros.

En la Figura 8. (A) se puede observar la plataforma de desarrollo *FreeSoC*, esta cuenta con un oscilador de 24MHz, dos ranuras mini USB de las cuales una es de programación. Un pulsador de reseteo, múltiples puertos de expansión además de los puertos estándar de Arduino. A propósito del IDE programador, como *FreeSoC* es basado en un PSoC5LP, este se programa con ayuda de la herramienta PSoC Creator ©.

**Figura 8. Plataformas de desarrollo de Hardware abierto, (A) *FreeSoC*, (B) *Shield* de Ethernet Arduino**



## 6. DISEÑO

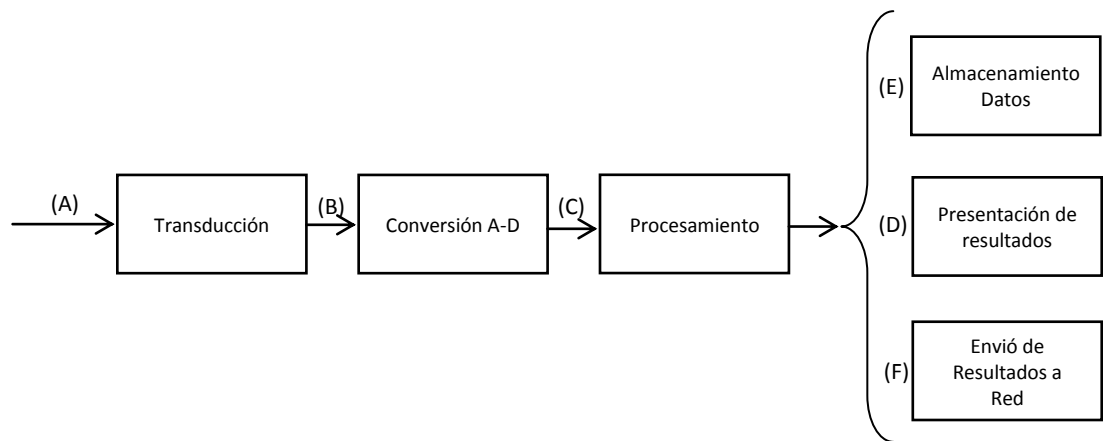
### 6.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe el diseño de un sistema transportable para el monitoreo de gases ambientales, este dispositivo tendrá la capacidad de monitorear hasta 5 gases que normalmente pueden encontrarse dentro de la atmosfera y que en concentraciones muy altas pueden ser nocivas para la salud humana. Estos gases son:  $O_3$ ,  $CO$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$  y  $VOC$ .

Aunque cada gas tiene una estructura molecular diferente, es posible captar sus concentraciones de una forma similar con ayuda de transductores especiales para cada gas. Entiéndase por concentración como la densidad de moléculas de un gas en un espacio determinado a una temperatura y humedad determinadas.

El monitor tendrá como objetivo medir las 5 concentraciones de gas mencionados anteriormente. Por ende estas concentraciones serán el referente de inicio para el proceso de diseño de instrumentación del monitor. El proceso funcional del monitor se describe en la Figura 9. En esta se describe el flujo de funcionamiento para una concentración de gas desde su sentido hasta su procesamiento y muestra de resultados.

**Figura 9. Diagrama de bloques del proceso funcional del monitor**



La señal de entrada (A) hace referencia a la concentración un gas cualquiera. Esta señal es sensada y acondicionada por el sistema de transducción, lo que da origen a la señal (B), la cual es una señal eléctrica, básicamente una tensión análoga proporcional a la concentración del gas. Luego, esta señal es digitalizada por medio de un conversor A-D (señal (C)), para su posterior procesamiento. En este punto la señal (C) es procesada mediante algoritmos de software para obtener una medida digital de la concentración del gas que se está midiendo.

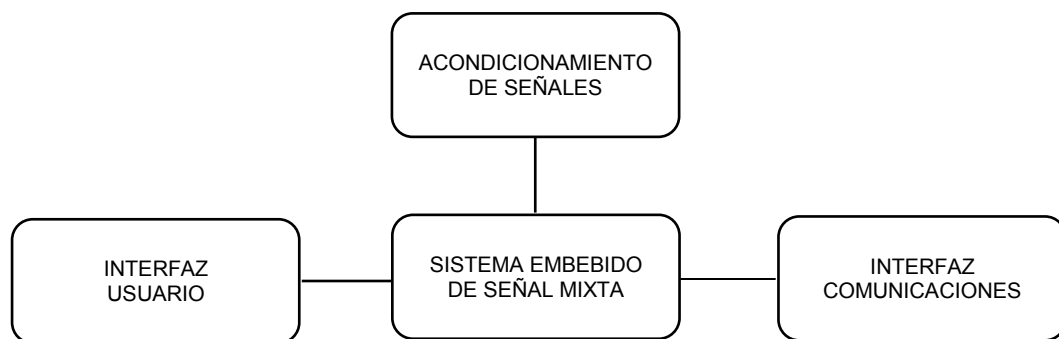
Llegado a este punto se decidió ofrecer al operador del monitor cierta flexibilidad con los resultados, ya que este puede almacenar los resultados en una memoria flash (E), enviarlos a algún portal web (F), mostrarlos en una pantalla LCD incorporada en el monitor (D) o realizar las 3 al tiempo.

## 6.2. IDENTIFICACIÓN DE TECNOLOGÍAS

A continuación se realiza la identificación de tecnologías para lograr un monitor de gases con las características previamente mencionadas. Además de ser un dispositivo transportable, también debe tener la capacidad de realizar muestreo en línea y en campo. No solo se busca conseguir unos resultados confiables que ofrezcan mediciones exactas, sino también realizar un dispositivo con tecnología de tamaño reducido y de bajo costo.

La Figura 10. Muestra esta identificación tecnológica, donde se pueden observar 4 bloques indispensables para alcanzar un monitor de gases con las especificaciones mencionadas.

**Figura 10. Diagrama de bloques general de un monitoreo de gases**



El sistema de acondicionamiento de señales contará con esa tecnología de sensores e instrumentación respectiva, en donde se generaran esas señales de tensión proporcionales a la concentración de los gases. Con este bloque se logra conseguir el sistema de transducción que se muestra en la Figura 9. Por ende se tomará como inicio del diseño del monitor.

La interfaz de comunicaciones dará al dispositivo la capacidad de conectarse a la red o en su defecto de almacenar datos en una memoria flash. Esto genera flexibilidad en la usabilidad del dispositivo, ya que dado cualquier caso, el operario puede acceder al dispositivo desde cualquier parte del mundo o almacenar la información obtenida por un determinado tiempo dependiendo la capacidad de almacenamiento que la memoria disponga.

El operario encontrara una interfaz de usuario amigable, en donde hallará una serie de controles y una pantalla LCD. En ella el usuario tendrá acceso a una serie de menús y podrá observar información acerca del dispositivo como la concentración de un gas o de los 5 gases si se desea, el estado de la conexión a la red, la cantidad de almacenamiento de la memoria flash, entre otros.

Por último, pero el bloque de mayor importancia es el del sistema embebido de señal mixta. A este bloque se le confiará la gestión de todo el dispositivo. Entre sus objetivos está recibir las señales análogas del sistema de acondicionamiento, transformar estas señales a digitales, procesarlas y mostrar los datos en la LCD. Además de realizar y mantener la comunicación con la interfaz de comunicaciones.

### **6.3. DISEÑO MODULAR DEL MONITOR**

Se diseñó un dispositivo modular donde cada uno de los módulos están interconectados. La

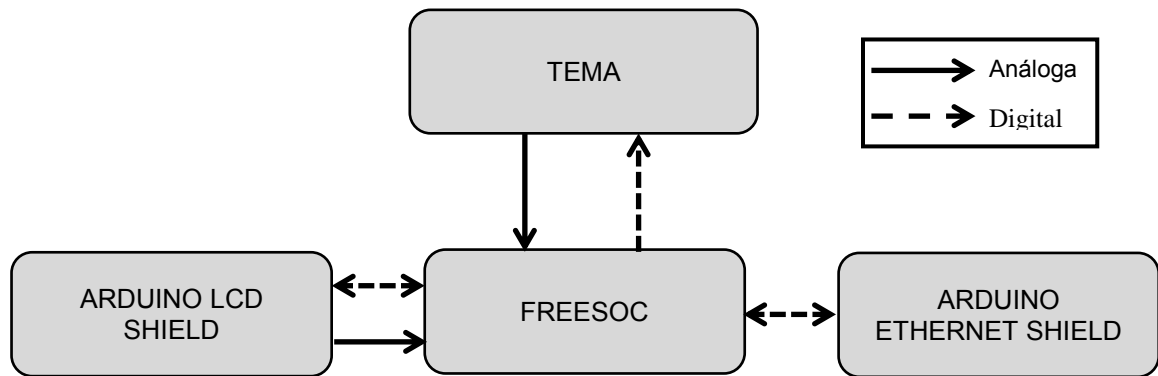
Figura 11. Muestra un diagrama de bloques similar a la figura anterior. La diferencia es que esta figura muestra en bloques los módulos electrónicos que se utilizaron en este dispositivo.

Así, es posible visualizar que la plataforma de desarrollo *FreeSoC* será el encargado de portar el sistema embebido de señal mixta. Una tarjeta electrónica denominada TEMA se diseñó con el objetivo de acondicionar las señales de los sensores. Un Arduino Ethernet *shield* es el hardware seleccionado que con ayuda



del *FreeSoC* realizará las comunicaciones. Por último la interfaz de usuario seleccionada es otro *shield* de Arduino con el propósito de cumplir la filosofía modular del dispositivo. En secciones posteriores de este capítulo se dará mayores especificaciones de cada uno de estos bloques.

**Figura 11. Diagrama de bloques del monitoreo de gases**



En esta figura se observa que el *FreeSoC* como sistema embebido administrará todo el dispositivo. TEMA envía señales análogas al *FreeSoC*, este a su vez le enviará señales digitales de control. Un protocolo de comunicación FULLD será el medio por el cual el Ethernet *shield* tendrá comunicación con el sistema embebido. Algunos de los puertos disponibles del *FreeSoC* fueron reservados para las señales necesarias en la interfaz de usuario de Arduino.

#### 6.4. DISEÑO DEL SISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL

En esta sección se hablará sobre uno de los diseños más críticos del monitor de gases. Un buen diseño de circuitos de acondicionamiento para los sensores seleccionados será una base confiable para el resto del diseño del dispositivo.

Como se mencionó antes, este dispositivo pretende monitorear concentraciones de  $O_3$ ,  $CO$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$  y  $VOC$ . Cada una de estas concentraciones será medida por su sensor de gas respectivo. Para este diseño se utilizará un sensor electroquímico que medirá la concentración de  $SO_2$  y cuatro sensores MOS que medirán la concentración de los gases restantes. A continuación se mostrará el diseño de acondicionamiento de estos sensores.

**6.4.1. Acondicionamiento de los sensores MOS.** Un sensor de tecnología MOS posee una capa sensible que al entrar en contacto con un determinado gas cambia su conductividad eléctrica. Esto se entiende como un cambio resistivo ante un cambio de concentración de gas. Para poder obtener este comportamiento, la capa sensible debe calentarse a una temperatura determinada, por lo cual estos sensores cuentan también con una resistencia calefactora. El fabricante recomienda polarizar esta resistencia a una potencia determinada para obtener la temperatura adecuada.

Es posible que los sensores trabajen a temperaturas diferentes, por ende, a potencias diferentes. Es por esto que se vuelve importante consultar al fabricante a la hora de utilizar un sensor específico.

**Cuadro 2. Temperaturas y potencias de trabajo de los sensores MOS**

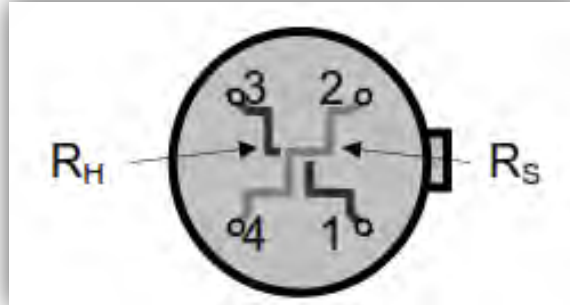
Sensor	Temperatura (°C)	Potencia (mW)
<i>CO</i>	360	83
<i>O<sub>3</sub></i>	430	80
<i>VOC</i>	340	76
<i>NO<sub>2</sub></i>	220	43

En el cuadro anterior se puede observar las temperaturas a las que trabajan internamente los sensores que se utilizaran en este diseño. Estos datos fueron obtenidos de sus hojas de datos correspondientes.

A pesar de las altas temperaturas internas a las que trabajan estos sensores, su área de calentamiento es muy pequeña por lo que no debe haber preocupación por quemar otros componentes del circuito de acondicionamiento. Esto también puede asimilarse observando la pequeña cantidad de potencia con que trabajan, ya que alcanzar esas temperaturas con potencias del orden de los mW, necesitan de resistencias de tamaño muy reducido.

Debido a la alta temperatura a la que debe llegar un sensor MOS, se hace necesario incluir un tiempo muerto antes de comenzar a tomar medidas, desde el momento en el que la resistencia calefactora se polariza hasta que alcance la temperatura indicada. Estos tiempos suelen variar constantemente ya que dependen de la humedad y temperatura ambiente donde se encuentre el sensor.

**Figura 12. Símbolo universal de un sensor de gas MOS**



La Figura 12. Muestra el símbolo electrónico de un sensor MOS. Se indican 2 resistencias: resistencia calefactora ( $R_H$ ) y resistencia sensitiva ( $R_S$ ).

También es recomendado colocar una resistencia en serie a  $R_H$  para controlar su potencia (Figura 13). El siguiente cuadro muestra las resistencias indicadas por las hojas de datos de los sensores utilizados.

**Cuadro 3. Resistencias serie de control de potencia**

Sensor	Potencia (mW)	Resistencia( $\Omega$ )
$CO$	83	75
$O_3$	80	82
$VOC$	76	82
$NO_2$	43	133

**Figura 13. Polarización de  $R_H$  con R1 para controlar potencia**

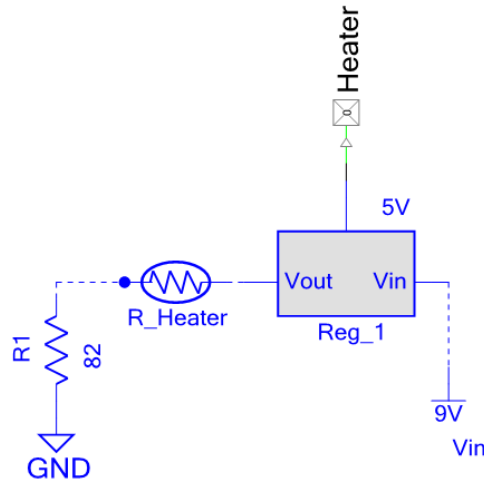


Esta polarización de  $R_H$  funciona perfectamente para controlar la potencia y obtener la temperatura interna deseada para estos sensores. Por otra parte, este diseño mantiene la alimentación constantemente sobre el circuito, lo cual lo hace poco rentable si se desea diseñar un dispositivo de bajo consumo. Recordar que el monitor de gases debe soportar 4 sensores MOS.

Debido a que el operario tendrá la capacidad de trabajar con la cantidad de sensores que desee, se hizo necesario crear un diseño en el cual sea posible desconectar la alimentación del circuito de polarización de  $R_H$  para evitar consumos de energía innecesarios.

La Figura 14. Muestra el circuito diseñado para controlar la potencia de  $R_H$ . Ahora, el circuito posee una alimentación regulada. El regulador de 5V posee un pin Calefactor (*Heater*) el cual funciona como un habilitador o des habilitador del regulador. Esto resultará ser útil ya que cada calefactor podrá controlarse de forma independiente.

**Figura 14. Circuito de polarización  $R_H$  con control de alimentación**



En el Cuadro 2. Se muestran las potencias típicas a las que debe trabajar cada sensor. Sin embargo el fabricante ofrece un rango de potencias en las que pueden trabajar estos. Este diseño opera con 76mW ya que es una potencia que se encuentra dentro de este rango en los sensores:  $CO$ ,  $O_3$  y  $VOC$ . Por otro lado, esta potencia queda excluida del rango del sensor de  $NO_2$ , por lo cual operará con la potencia típica que el fabricante recomienda. En la literatura de sensores de gas MOS suele encontrarse este tipo de recomendaciones, ya que la mayoría de sensores MOS pueden funcionar con 76mW o en su defecto con 43mW.

Para fines prácticos se establecieron algunas convenciones para estas potencias. Para los sensores que trabajen con 76mW, se dirá que operan en Potencia Alta (PA) y los que trabajen a 43mW se dirá que operan en Potencia Baja (PB).

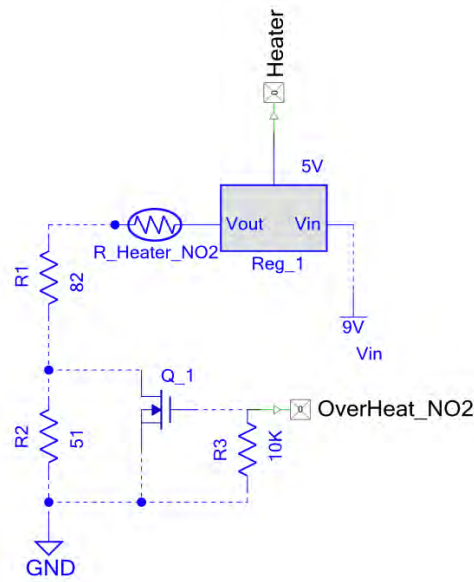
En la Figura 14 se puede observar que  $R_1$  tiene un valor de  $82\Omega$ , resistencia necesaria para operar el sensor en PA.

La resistencia necesaria para operar el sensor de  $NO_2$  en PB debe ser de  $133\Omega$ . Sin embargo, este y todos los sensores MOS que operen en PB presentan un cambio en su funcionamiento inicial con respecto a los que operan en PA.

Un sensor que opera en PA solo es necesario polarizarlo y esperar un tiempo para que alcance su temperatura indicada. Por otro lado, un sensor que opere en PB debe iniciar con una polarización en PA por un tiempo determinado. Esto con la intención de ayudar al sensor a estabilizarse más rápido. Pasado este tiempo se debe cambiar la potencia y operar el sensor en PB. El fabricante recomienda un tiempo de 90 segundos en el cual garantiza y evita daños en el sensor. También es útil proporcionarle PA una vez cada 24 horas para quemar impurezas acumuladas en la capa sensible del sensor.

Por lo anterior se hizo necesario diseñar un circuito el cual permita cambiar la polarización de  $R_H$  de PA a PB. La Figura 15 muestra este circuito.

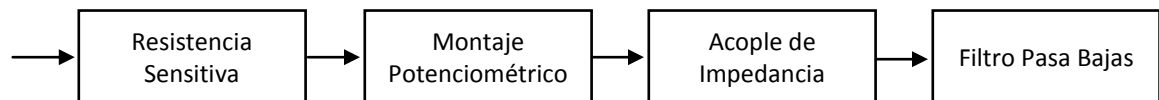
**Figura 15. Circuito de polarización de  $R_H$  para sensores en PB**



A diferencia del circuito de la Figura 14, este presenta 2 resistencias (R1 y R2) que ubicadas en serie, controlan la PB sobre  $R_H$  ( $R\_Heater\_NO2$ ). Un interruptor electrónico representado por un transistor ( $Q\_1$ ) es el encargado de realizar el cambio entre potencias. Este cambio depende del estado del pin de control de potencia ( $OverHeat\_NO2$ ). De igual manera este circuito presenta una alimentación regulada, donde el regulador de 5V ( $Reg\_1$ ) puede ser habilitado o deshabilitado dependiendo del estado del pin Calefactor ( $Heater$ ).

**6.4.1.1. Medición del sensor resistivo.** “Los sensores MOS contienen una capa sensible cuya resistencia cambia dependiendo de la concentración de gas cuando se calienta a una temperatura adecuada”<sup>28</sup>. Una vez proporcionada la potencia adecuada a  $R_H$  se prosigue a acondicionar la señal que entrega  $R_S$ . En la Figura 16 es posible apreciar las etapas del acondicionamiento de la señal.

**Figura 16. Diagrama de bloques del acondicionamiento de la señal de  $R_S$**



Inicialmente,  $R_S$  cambia su resistencia dependiendo de la concentración de gas que se presente. Gracias a esto, resulta importante medir esta resistencia para determinar la concentración de gas que exista. Esta  $R_S$  se encuentra acoplada sobre un divisor de tensión. La tensión de salida entra a un circuito de acople de impedancia, finalmente la señal pasa por un filtro para ser enviada a la fase de digitalización.

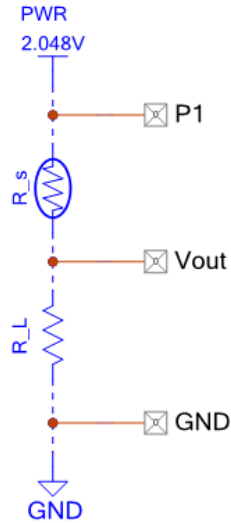
La resistencia sensitiva de estos sensores posee una potencia máxima de 1mW. Por esto se debe garantizar que por esta  $R_S$  no sobrepase esta potencia. El circuito de la

Figura 17 muestra un circuito recomendado por el fabricante donde se observa una resistencia de carga ( $R_L$ ) en serie con  $R_S$ .

---

<sup>28</sup> E2V Metal Oxide Semiconductor [En línea]. California: E2V technologies, 2010 [consultado 25 de abril de 2013]. Disponible en Internet: <http://airqualityegg.wikispaces.com/file/view/micsuserguide.pdf>.

**Figura 17. Circuito de acondicionamiento de  $R_S$**



La tensión de salida ( $V_{out}$ ) es dada por una simple expresión de divisor de tensión.

**Figura 18. Ecuación de divisor de tensión**

$$V_{out} = \frac{R_L * 2.048V}{R_L + R_S}$$

Despejando  $R_S$ , entonces:

**Figura 19. Ecuación para la resistencia sensitiva**

$$R_S = R_L * \left( \frac{2.048V}{V_{out}} - 1 \right)$$

La tensión de salida ( $V_{out}$ ) será medida directamente del circuito de acondicionamiento con lo cual será posible determinar  $R_S$ .



En la hoja de datos de un sensor se puede observar una curva donde se relaciona el valor de  $R_s$  con el valor de la concentración de gas que se está midiendo. Esta curva no siempre es lineal, sin embargo, realizando su correspondiente ajuste es posible determinar una expresión que relacione resistencia y concentración.

**Otro aspecto importante de estos sensores es su rango de medición. El Cuadro 4**

presenta el rango de concentración que pueden medir los sensores utilizados.

**Cuadro 4. Rangos de concentración de los sensores**

Rango de detección (Concentración)		
	Min.	Max.
CO	10 PPM	100 PPM
O3	10 PPB	1000 PPB
NO2	0,05 PPB	5 PPB
VOC	1 PPM	1000 PPM

Estos datos tomados de las hojas de datos, representan un rango en la zona de mayor linealidad de la curva de concentración con respecto a la resistencia  $R_s$ . Es posible apreciar que algunos sensores miden concentraciones en PPM y otros en PPB. Estos datos generan un rango de resistencia en los sensores que se puede observar en el siguiente cuadro.

**Cuadro 5. Rangos de resistencia de los sensores**

Rango de detección (Resistencia) (KOhm)		
	Min.	Max.
CO	100	1000
O3	3	60
NO2	0,8	8
VOC	100	1500

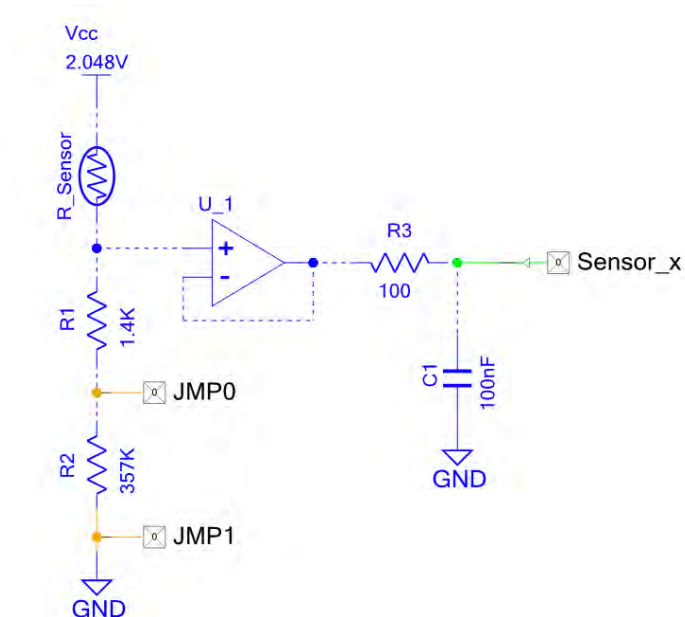
Apreciando estos datos obtenidos también de las hojas de datos correspondientes de cada sensor, es posible concluir que conseguir una exactitud alta en las mediciones de resistencia de algunos sensores no será posible si se utiliza el circuito de la

Figura 17. La exactitud de la medición de la resistencia está relacionada con el número de bits del ADC en la parte de digitalización del sistema y también la diferencia entre  $R_S$  y  $R_L$ . La precisión es mayor cuando  $R_S$  está cerca de  $R_L$ .

La resistencia de carga  $R_L$  presenta una relación proporcional a  $R_S$  según la ecuación de la Figura 19. Por esta razón se diseñó un circuito donde  $R_L$  varíe dependiendo del rango de medición del sensor para obtener una medición de mayor precisión.

La Figura 20 muestra el circuito de acondicionamiento diseñado. En este circuito, la serie entre R1 y R2 forman la correspondiente resistencia de carga  $R_L$ . Esta característica permite al usuario seleccionar entre 2 rangos por medio de un *Jumper* externo en los terminales JMP0 y JMP1.

**Figura 20. Circuito de acondicionamiento de la señal del sensor**



Se ha denominado rango bajo (RB) a la configuración del circuito con *Jumper*. En esta configuración,  $R_L = 1.4K\Omega$  la cual mantiene su potencia por debajo del

máximo permitido por el fabricante (1mW). Esto se determinó mediante el teorema de máxima transferencia de potencia donde se afirma que la mayor potencia estará presente cuando  $R_S = R_L = 1.4K\Omega$ . Para una alimentación de 2.048V, la potencia máxima en  $R_S$  esta dada por:

**Figura 21. Ecuación para máxima transferencia de potencia en  $R_S$**

$$P_{max} = \frac{1.024^2}{1.4K} = 0.75mW$$

Por otro lado, se denominó rango alto (RA) a la configuración del circuito sin *Jumper*. En donde  $R_L = 358.4K\Omega$ , esto es 256 veces 1.4K lo cual permite generar una rutina común de software que puede ser usada para ambos rangos de conversión de tensión a resistencia. Por ejemplo una salida de tensión ( $V_{out}$ ) de 1.19466V corresponde a  $R_S$  de  $1K\Omega$  en RB y a  $R_S$  de  $256K\Omega$  en RA.

El circuito concluye con un buffer de acoplamiento de impedancia y un filtro pasa bajas para eliminar cualquier ruido existente en el dispositivo. La señal de salida (Sensor\_x) generará la tensión de salida necesaria para hallar  $R_S$ . Este circuito se diseñó de forma general, es decir para soportar cualquier tipo de sensor de gas MOS.

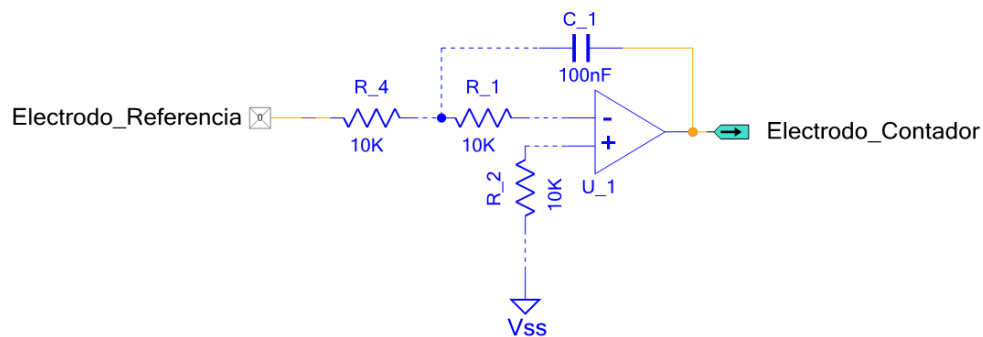
**6.4.2. Acondicionamiento del Sensor electroquímico.** El circuito de acondicionamiento de un sensor electroquímico consta de 3 partes; un circuito de control de tensión, un circuito para la medición y un transistor JFET de protección al apagar el dispositivo.

El circuito de acondicionamiento debe proporcionar una tensión y una corriente suficiente para mantener a igual potencial el electrodo de referencia y el electrodo de trabajo.

Para el caso de la medición del gas  $SO_2$  se presenta una reacción de oxidación por lo cual la corriente fluye desde el electrodo contador hacia el electrodo de trabajo. Esta corriente fluye de forma proporcional a la concentración del gas. El circuito de acondicionamiento debe proporcionar la cantidad de corriente que el sensor necesite según sea la cantidad de concentración del gas que se va a medir, por lo cual se requiere el circuito de control de tensión. El diseño de este circuito se

muestra en la Figura 22, el cual está constituido por un amplificador operacional donde su entrada inversora está conectada al electrodo de referencia a través de una resistencia, por lo cual no drenará una corriente significativa de este, su salida es realimentada a través de un condensador hacia una resistencia de  $10\text{k}\Omega$  esto para eliminar posibles ruidos que pueda tener el circuito y mantener el voltaje del electrodo de referencia igual al del electrodo de trabajo. A su vez la salida está conectada al electrodo contador, por lo cual este operacional es quien supe la tensión que este electrodo necesita para generar la corriente.

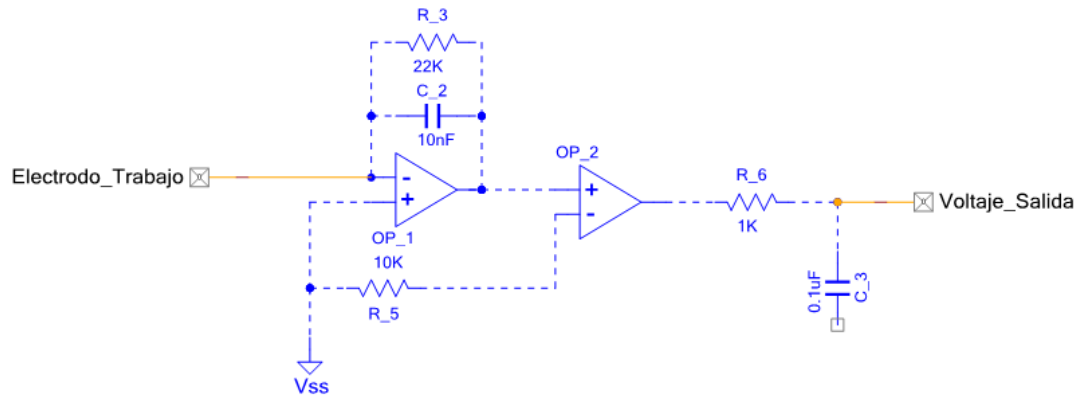
**Figura 22. Circuito de control de tensión**



El circuito para la medición de corriente mostrado en la Figura 23, consta de un amplificador operacional conectado en configuración de transimpedancia, su función principal es convertir la corriente que llega por la entrada inversora en una tensión proporcional. La corriente que sale del electrodo de trabajo se refleja en la resistencia que está en la realimentación del operacional generando una tensión de salida relativa a la tierra virtual, en paralelo a la resistencia de realimentación se conecta un condensador para reducir ruidos de alta frecuencia.

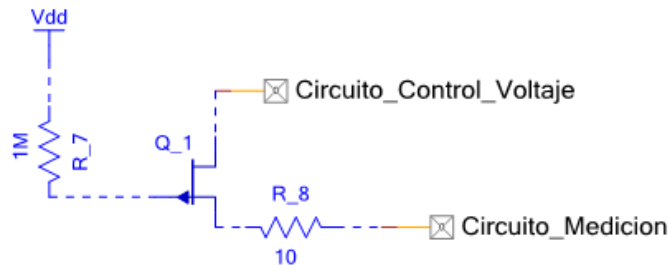
En muchos casos los fabricantes recomiendan que la salida tenga 2 etapas, una etapa de ganancia para la salida y otra de transimpedancia. Las dos etapas son recomendadas debido a que con un valor bajo en la resistencia de realimentación el circuito en la primera etapa, el circuito de medición se opone a la corriente del sensor en situaciones transitorias, luego de la etapa de ganancia se pone un filtro pasa bajos para eliminar ruidos de altas frecuencias y obtener mayor precisión en la tensión de salida.

**Figura 23. Circuito de medición de corriente**



Cuando se desea apagar el dispositivo, puede generarse una corriente alta, debido a la concentración del gas, entre el electrodo contador y el de trabajo, cuando se libera la alimentación se debe asegurar que esa corriente no genere una tensión diferente entre el electrodo de trabajo y el de referencia, por lo cual, el fabricante propone utilizar un transistor JFET y una resistencia para realizar un cortocircuito entre estos dos electrodos cuando la alimentación se haya removido. Este circuito es mostrado en la siguiente figura.

**Figura 24. Circuito de protección al apagado**

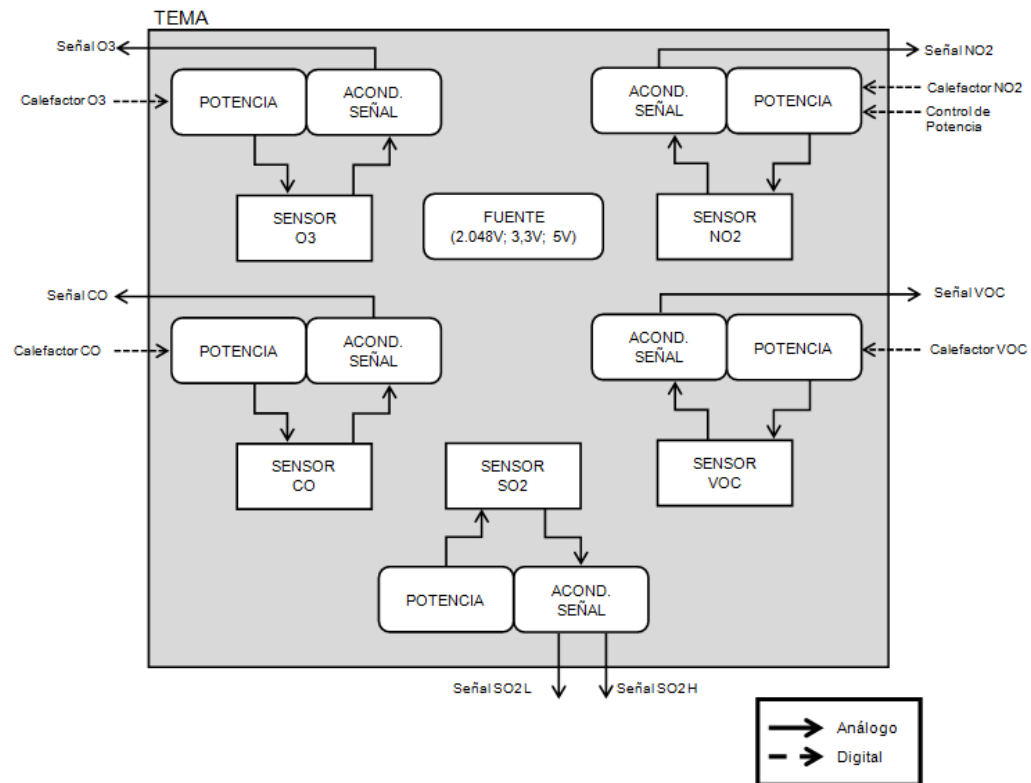


El transistor JFET es entonces utilizado en la configuración del modo de agotamiento (*depletion-mode*), esto es cuando un dispositivo necesita que la tensión que hay conectado a *source* sea igual a la conectada a *gate*, es decir la tensión entre *gate-source* es cero, esto mantiene la compuerta dentro del JFET constante, lo que significa que la corriente *source-drain* no puede cambiar

abruptamente, sino que es controlada proporcionalmente según aumenta o disminuye el voltaje *gate-source*. Cuando el dispositivo se apaga el JFET entra en estado de alta impedancia lo que permite el cortocircuito entre electrodo de trabajo y el de referencia.

**6.4.3. TEMA: Tarjeta Electrónica para el Monitoreo Ambiental.** Una vez diseñados los circuitos de acondicionamiento de los sensores, se prosiguió a diseñar una tarjeta electrónica la cual contará con 4 circuitos de acondicionamiento de sensores MOS y uno electroquímico. La Figura 25 muestra en bloques un diagrama de la constitución de esta tarjeta denominada TEMA.

**Figura 25. Diagrama de bloques funcional de TEMA**



En una descripción resumida, se puede apreciar que TEMA presenta los 5 acondicionamientos de señal correspondientes a cada sensor de gas mencionados anteriormente. Consta de seis señales análogas de salida, cuatro de sensores MOS y dos del electroquímico. Cuatro señales digitales controlaran el calefactor de cada sensor MOS y una señal digital controlará la potencia del sensor de  $NO_2$ . Todas estas señales serán dirigidas o vendrán del sistema embebido de señal mixta que se explicara en un capítulo posterior.

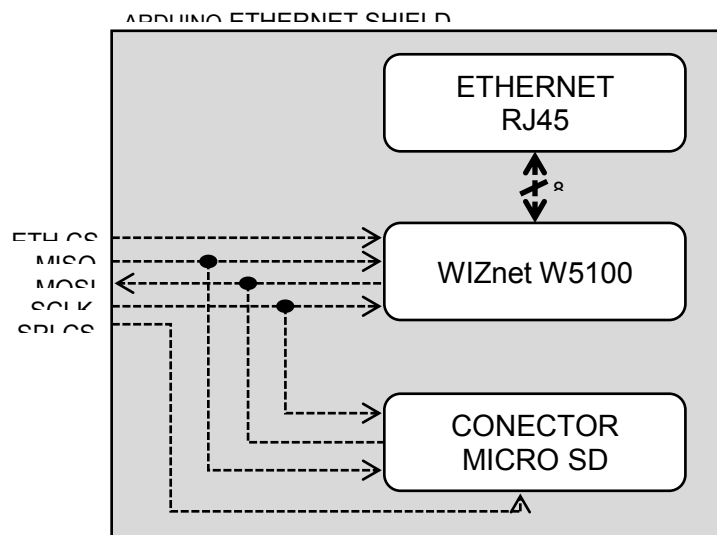
TEMA también consta de una fuente con diferentes niveles de tensión regulados necesarios para todos los circuitos presentes en esta tarjeta. TEMA fue diseñada tomando como referente un *shield* de Arduino, esto garantiza la estructura modular que se quiere para este dispositivo.

## 6.5. DISEÑO DE LA INTERFAZ DE COMUNICACIONES

La capacidad de comunicación que ofrezca este dispositivo dará al usuario la facilidad de observar sus datos obtenidos o información del dispositivo. Esto genera cierta flexibilidad de uso para el dispositivo. Un dispositivo Arduino será el encargado de realizar esta tarea. El *Ethernet Arduino Shield* presta grandes utilidades en este dispositivo. La

Figura 26 muestra un diagrama de bloques del contenido electrónico de este *shield*.

**Figura 26. Diagrama de bloques del Arduino *Ethernet Shield***



Como ya se comentó anteriormente, este *shield* presenta una interfaz W5100 la cual genera una IP estática la cual proporciona al dispositivo una conexión a red controlada por un bus SPI, esto crea la posibilidad de realizar un servidor web donde es posible almacenar datos obtenidos por el monitor y visualizarlos desde cualquier lugar donde se tenga conexión a red y con la IP que el *shield* genere.

El conector *micro-SD* ofrece la posibilidad de guardar información del dispositivo, como mediciones, tiempo, datos estadísticos que pueda generar el dispositivo, entre otros. Se puede apreciar que el bus SPI comparte algunos bits con la interfaz W5100 y el conector *micro-SD*. Esto resulta importante cuando se diseña el código firmware para controlar este dispositivo, ya que solo es posible utilizar uno de ellos. Para esto se utilizaron librerías abiertas existentes de Arduino. Estas librerías, aunque muy útiles, debieron ser modificadas. Esto se realizó en una investigación previa a este trabajo en la Universidad Autónoma de Occidente. Las librerías modificadas se usaron para este proyecto.

El bus SPI es conectado al sistema embebido de señal mixta. La alimentación de este *shield* viene de TEMA en un módulo inferior.

## **6.6. DISEÑO DE LA INTERFAZ DE USUARIO**

Para el diseño de la interfaz de usuario se utilizaron un *shield* de pantalla LCD como muestra la Figura 27, la cual consta de una pantalla LCD de 16x2, un *encoder* con movimiento relativo a izquierda y derecha, y un joystick con funciones de arriba, abajo, derecha, izquierda y centro.



**Figura 27. Shield LCD Arduino**



Las funciones a las cuales el usuario puede acceder son; ver en la pantalla las concentraciones de los 5 gases al mismo tiempo, ver la concentración específica de una canal y enviar los datos a la red por medio de *Ethernet*. Es algo muy sencillo pensado para que una persona no necesite ser muy capacitada para utilizar el monitor.

La pantalla se conecta al FreeSoC donde se enviará la información que se debe desplegar en pantalla de acuerdo a las entradas que el usuario opere, la entrada principal es la del joystick por la cual el usuario puede apagar y prender la luz de fondo, oprimir el botón de derecha para ver cada canal específico, hacia la izquierda volver al menú de los 5 canales al mismo tiempo, por defecto el monitor muestra en pantalla los 5 canales cuando se enciende el dispositivo.

## **6.7. DISEÑO DEL SISTEMA EMBEBIDO DE SEÑAL MIXTA**

En esta sección se hablará sobre el modulo que controlará y gestionará todo el sistema. Un dispositivo PSoC5 tendrá esta responsabilidad. Para ello se han identificado los recursos que serán necesarios para cumplir con este objetivo. La

Figura 28 muestra un diagrama de bloque de los “módulos de usuario” que se identificaron para gestionar todo el sistema.

En primer lugar las señales digitales que controlaran los calefactores y el controlador de potencia de la tarjeta TEMA serán controladas directamente por software.

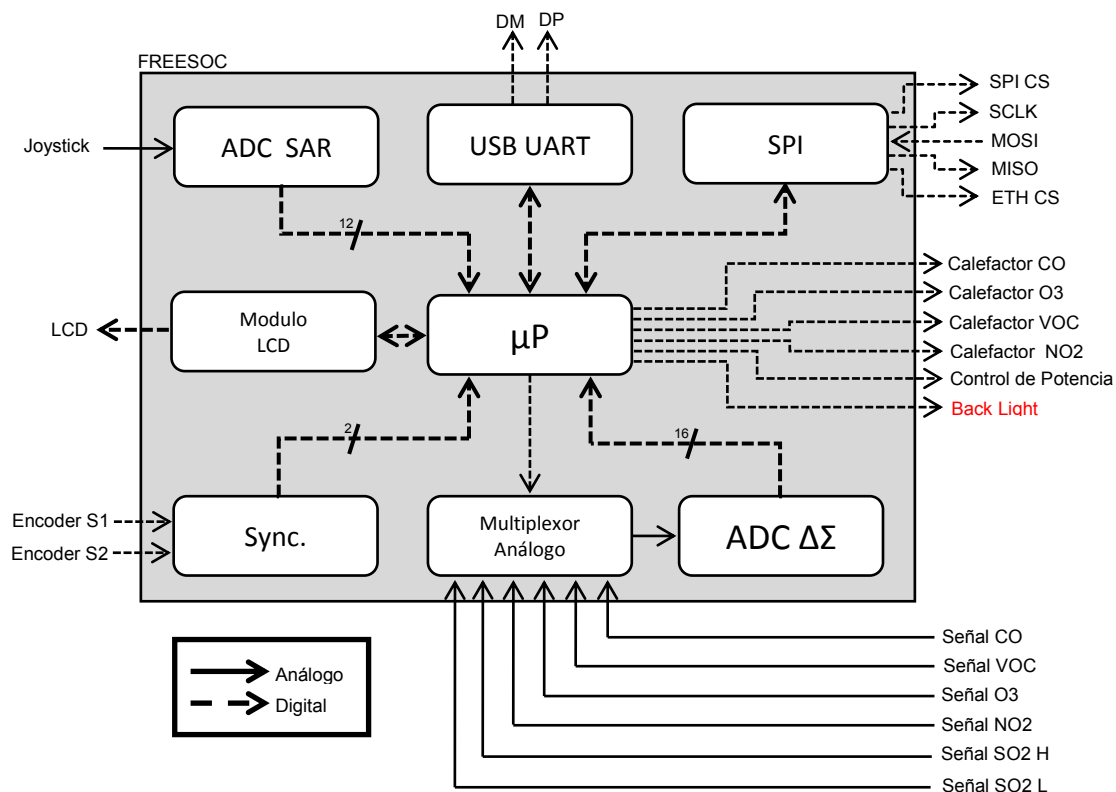
Por otro lado, las señales análogas que envía TEMA entraran a un multiplexor análogo (Amux). La selección del canal de este Amux será controlada por software.

Un ADC  $\Delta\Sigma$  incorporado en el sistema embebido será el encargado de convertir la señal análoga proveniente del Amux a una señal digital. Aunque el fabricante de los sensores recomienda un ADC mínimo de 10 bits para obtener una medición precisa, este ADC  $\Delta\Sigma$  tendrá una resolución de 16 bits, con lo cual la precisión de este no tendrá discusión. La señal digitalizada es enviada al microprocesador (uP) el cual se encargará de realizar su respectivo análisis y procesamiento.

Existe un módulo SPI el cual se encarga de generar el protocolo de comunicación que será usado para la interfaz de comunicaciones. Este módulo comunica con el uP el cual decide si trabajar con Ethernet o con micro-SD.

La interfaz de usuario genera y recibe muchas señales, entre ellas se encuentran 2 señales digitales que genera el *encoder*. El sistema embebido adquiere estas señales por medio de un módulo sincronizador y posteriormente son enviadas al uP para su procesamiento. Un módulo LCD dentro del sistema embebido facilita la utilización de una pantalla LCD. Con ayuda de la API de este módulo, es posible mostrar textos, números o graficas sin mayores esfuerzos. La señal análoga del Joystick ingresa al sistema embebido por medio de un ADC tipo SAR. Este ADC con resolución de 12 bits no es tan eficiente como el que se utilizó para las señales de los sensores. Sin embargo para esta aplicación es suficiente. Aunque no se ha mencionado anteriormente, este sistema embebido presenta un módulo USB por el cual el usuario tendrá la posibilidad de programar su dispositivo solo a nivel de especificaciones.

**Figura 28. Diagrama de bloques del sistema embebido**



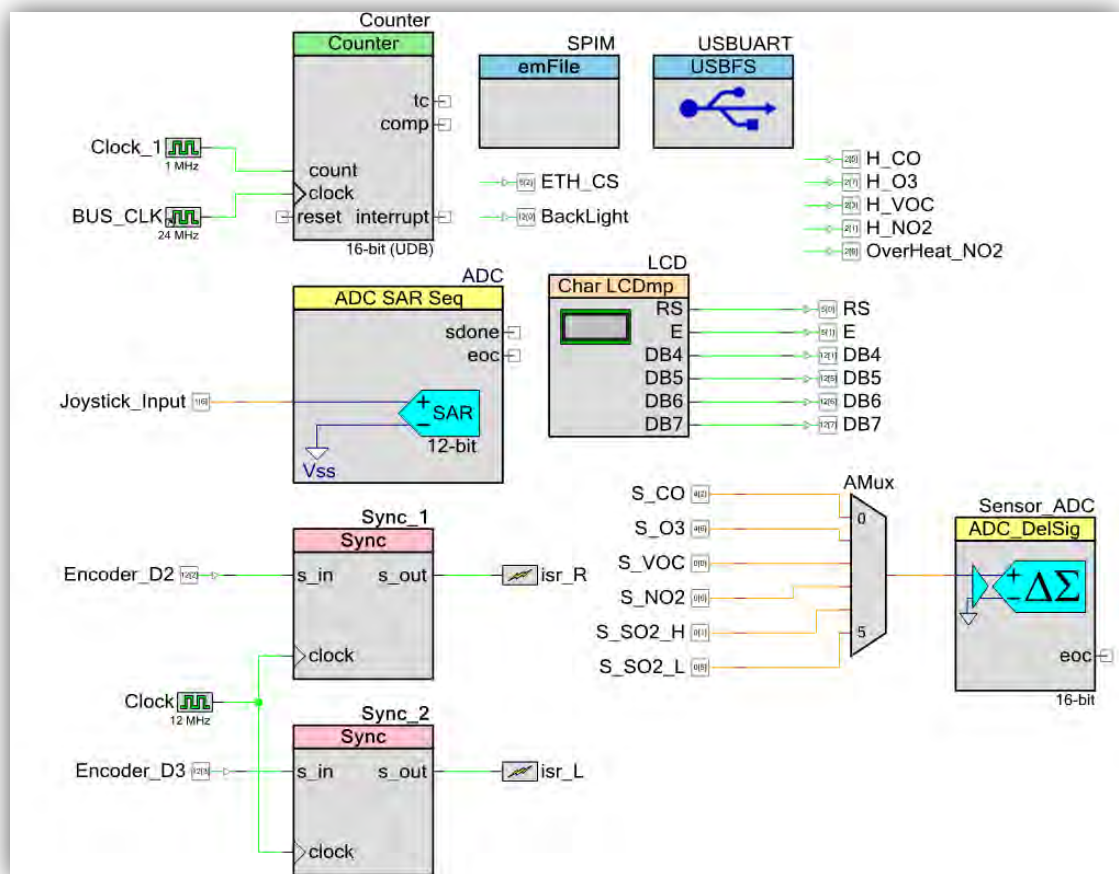
Un PSoC5 de bajo consumo incorporado en un *shield* de Arduino llamado *FreeSoC* es la tarjeta electrónica encargada de realizar esta gestión. Su alimentación de 3.3V proviene de TEMA. Todas las señales digitales que genera este sistema embebido son a 3.3V lo cual lo hace ideal para crear aplicaciones de bajo consumo. Como todos sus pines de propósito general son de señal mixta, es posible configurarlos como se desee, en este caso para que coincidan con las señales digitales y análogas de TEMA.

## 7. IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS

### 7.1. PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA EMBEBIDO DE SEÑAL MIXTA

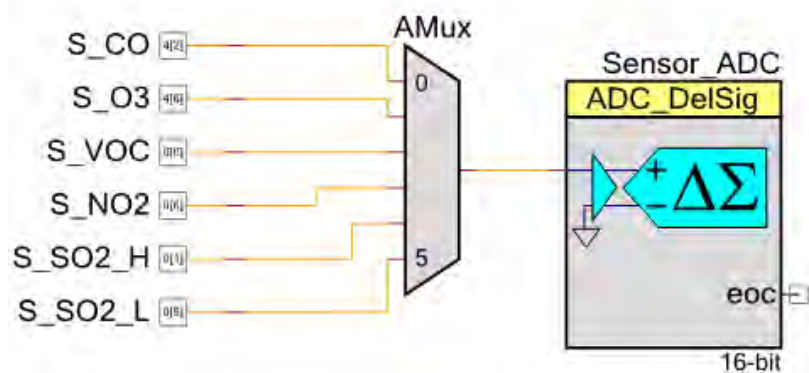
En la implementación del sistema embebido de señal mixta se utiliza el *FreeSoC*, el cual como se describió anteriormente se programa en el software *PSoC Creator*, a continuación se muestra la Figura 29 que contiene el esquemático realizado en el software, partiendo del diagrama de bloques del diseño se tienen en cuenta todos los módulos necesarios para que el monitor de gases tenga las características mencionadas en ese capítulo, se presenta entonces cada módulo con sus respectivas entradas y salidas para realizar la administración de la información a través de todo el sistema.

Figura 29. Esquemático sistema implementado en *PSoC Creator*



La Figura 30 presenta la adquisición de las medidas de los sensores por parte del *FreeSoC*, se utiliza un multiplexor análogo de 6 canales de entrada, el multiplexor es un seleccionador de datos, el cual para cada instante de tiempo toma la señal de un canal, la secuencia de selección es controlada por software, en este caso la secuencia es en orden, primero se toma la señal del canal 0, se pasa a la salida y una vez termina la acción se toma la señal del siguiente canal y así sucesivamente, la frecuencia a la cual se procesa cada señal es del orden de los MHz por lo cual el usuario no percibirá esta selección sino que se verá todos los canales como si se obtuvieran al mismo tiempo, la señal seleccionada del multiplexor sale hacia la etapa de digitalización que compone un ADC  $\Delta\Sigma$ . Este conversor tiene 16 bits de resolución lo cual indica que se perciben cambios muy pequeños (del orden de los 76 $\mu$ V) en la tensión de entrada para cambiar el valor digital a procesar, esto da como resultado mayor precisión en el valor tomado.

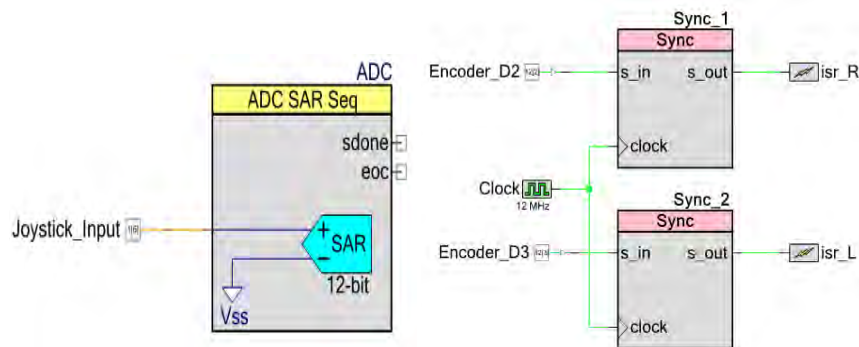
**Figura 30. Multiplexor análogo y ADC delta sigma**



En la Figura 31 describe los módulos para la adquisición de los datos de entrada que concierne a la interfaz de usuario, para la entrada respectiva al Joystick se le asigna un puerto de entrada análogo y se lleva a un módulo de ADC SAR con una resolución de 12 bit para su digitalización.

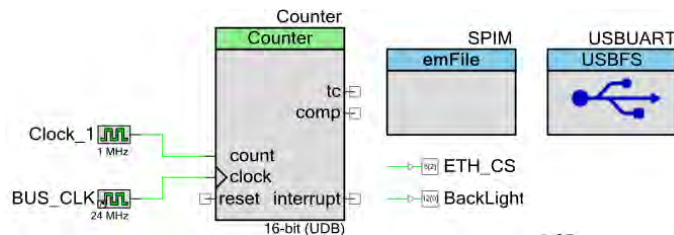
Para las señales del *encoder* se utilizan un módulo de sincronización y una señal de reloj respectiva de acuerdo al reloj interno del *FreeSoC*, estas señales ya son digitales por lo cual no se requiere un convertidor de análogo a digital.

**Figura 31. Módulos de usuario: Configuración del *Encoder* y Joystick**



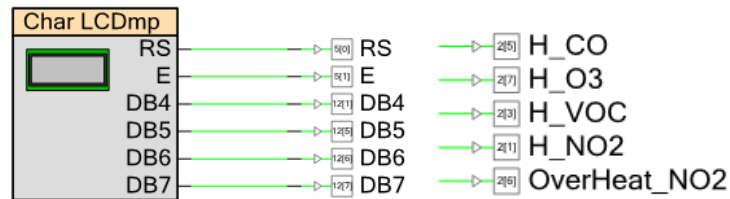
Para la comunicación con el *shield* de Arduino se muestra la Figura 32 en la cual están los bloques respectivos para la comunicación y el funcionamiento de este módulo, se requiere de un contador el cual dará la señal de reloj al Arduino para tener la sincronización con el *FreeSoC*, el módulo de comunicación por el protocolo SPI el cual hace la transferencia de los datos para que llegue al *shield* y salga la información a través de Ethernet. Además se encuentra el módulo de USB el cual requiere de un protocolo UART para enviar la información hacia el *shield* y almacenar los datos registrados en la tarjeta micro SD.

**Figura 32. Módulos de usuario de configuración SPI y UART USB**



En la Figura 33 se presenta el modulo para la lectura de las medidas a través de la pantalla LCD, este bloque controla el envío de los datos necesarios para la adaptación de la pantalla, además muestra los puertos de salida asignados para cada una de las señales de control de los calefactores para cada sensor.

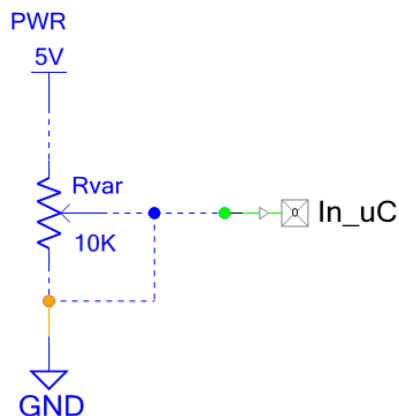
**Figura 33. Modulo LCD y pines digitales de salida**



## 7.2. PRUEBA DEL SISTEMA EMBEBIDO DE SEÑAL MIXTA

Una vez implementado los modulos con su respectiva programacion, se prosigue a probar el sistema, para los sensores con tecnologia MOS se lleva a cabo un circuito divisor de tension donde una resistencia variable toma el lugar del sensor de gas, de acuerdo a los kit de evaluacion de los sensores de la compañía *SGX Sensortech*. La Figura 34 describe el circuito de prueba realizado.

**Figura 34. Divisor de tensión de prueba**



Como son 6 canales se implementarion 6 divisores de tension independientes, se ajusta un valor a la resistencia variable para generar un una tension de entrada al *FreeSoC*, una vez procesada cada señal del divisor se muestra en la pantalla LCD, y este valor se compara con un multimetro para dar nocion de exactitud del sistema.

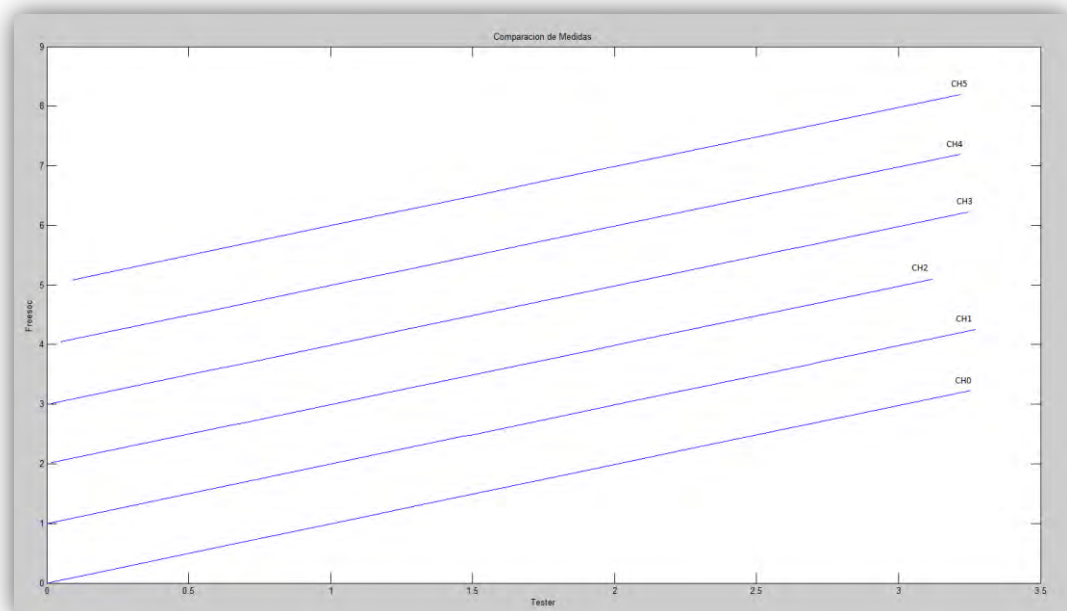
Dado que el monitor se pensó para medir 5 gases, son necesarios 5 sensores de los cuales 4 son de tecnología MOS y 1 es Electroquímico. Este último sensor trabaja de forma diferente a los tipo MOS, para su implementación fue necesario un acondicionamiento de señal diferente. El sensor electroquímico de SO<sub>2</sub> entre sus 3 terminales entrega una corriente proporcional a la concentración de gas que está midiendo, por ende fue necesario convertir esa corriente proporcional en un voltaje proporcional.

Para esto se diseñó un acondicionamiento de señal que tuviera dos salidas de voltaje las cuales serán procesadas posteriormente en el *FreeSoC* para dictar una concentración de gas acertada. Gracias a estas dos señales del sensor electroquímico, son necesarios 6 canales en el sistema.

Cada uno de los canales del sistema fue evaluado para un rango de voltaje de 0 a 3.3V. Posteriormente se registraron los datos del tester y del sistema y se graficó su respuesta. A continuación en la

Figura 35 se pueden apreciar los resultados obtenidos de esta evaluación.

**Figura 35. Prueba de linealidad de cada canal de *FreeSoc***





Los resultados anteriores pueden evidenciar la exactitud que tiene el sistema en cada uno de sus canales. Ya que para cada canal se observa que se superponen las rectas que conciernen a las medidas registradas por el sistema y las registradas por el tester.

se procede a sacar la ecuación que describe cada una de las rectas, en el Cuadro 6 se muestra para cada canal el valor de la pendiente y le intercepto correspondiente, además el valor promedio de la pendiente y el intercepto.

**Cuadro 6. Valores de las rectas, (M) pendiente, (B) intercepto**

<b>PROMEDIO DE LAS RECTAS</b>	
M(CH0)	1,0061
M(CH1)	1,006
M(CH2)	1,0061
M(CH3)	1,0055
M(CH4)	1,0056
M(CH5)	1,0056
<b>M(PROM)</b>	<b>1,005816667</b>
B(CH0)	0,0007
B(CH1)	0,0007
B(CH2)	0,0009
B(CH3)	0,0023
B(CH4)	0,0017
B(CH5)	0,0016
<b>B(PROM)</b>	<b>0,001316667</b>

**Figura 36. Recta promedio de las medias del sistema**

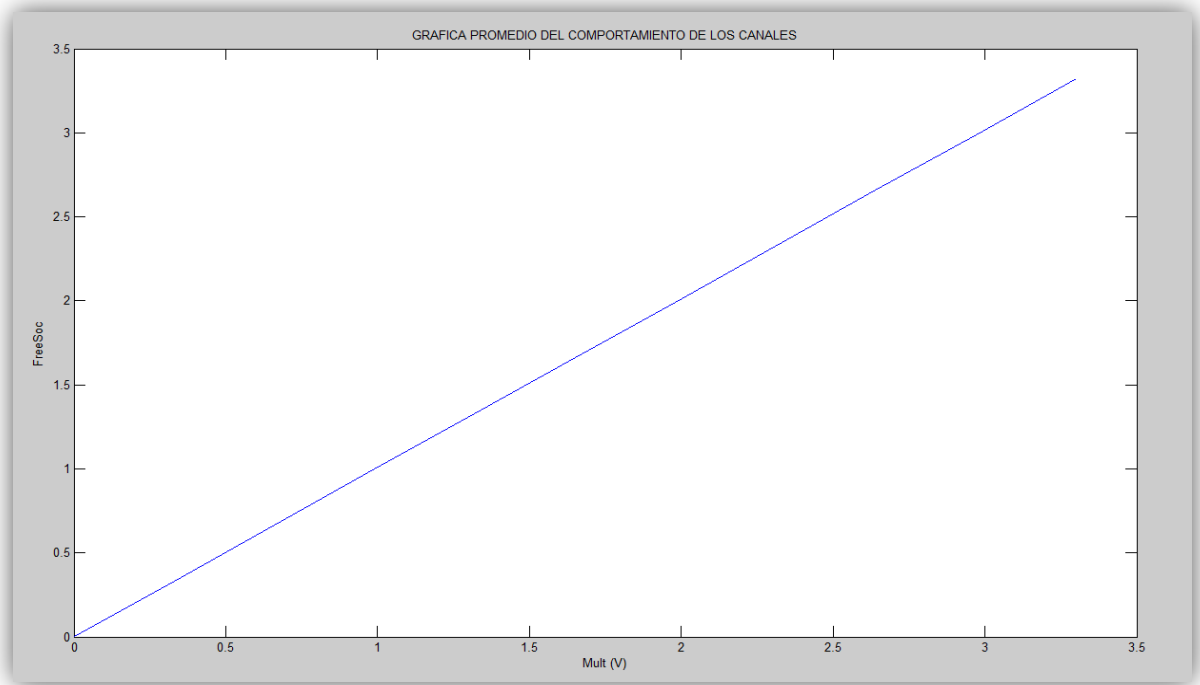


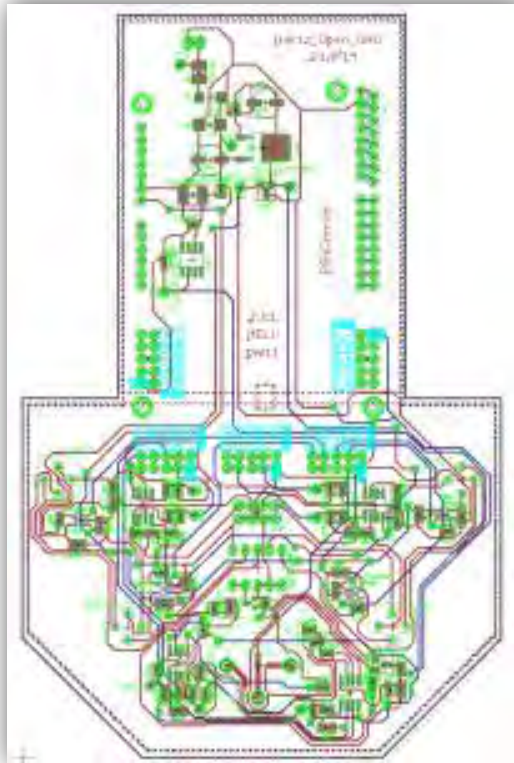
Figura 36 muestra en promedio como se comporta cada canal del sistema comparado con el tester de referencia. Con una pendiente de recta de 1.006 y el corte con el eje de las ordenadas de 0.001 es posible concluir que el sistema trabaja a con una exactitud considerable, con lo cual es posible validarse su rendimiento y continuar con la implementación del monitor.

### **7.3. IMPLEMENTACION DE LA TEMA**

Una vez probada la programación del sistema se procede al desarrollo de la tarjeta electrónica para el monitoreo ambiental.

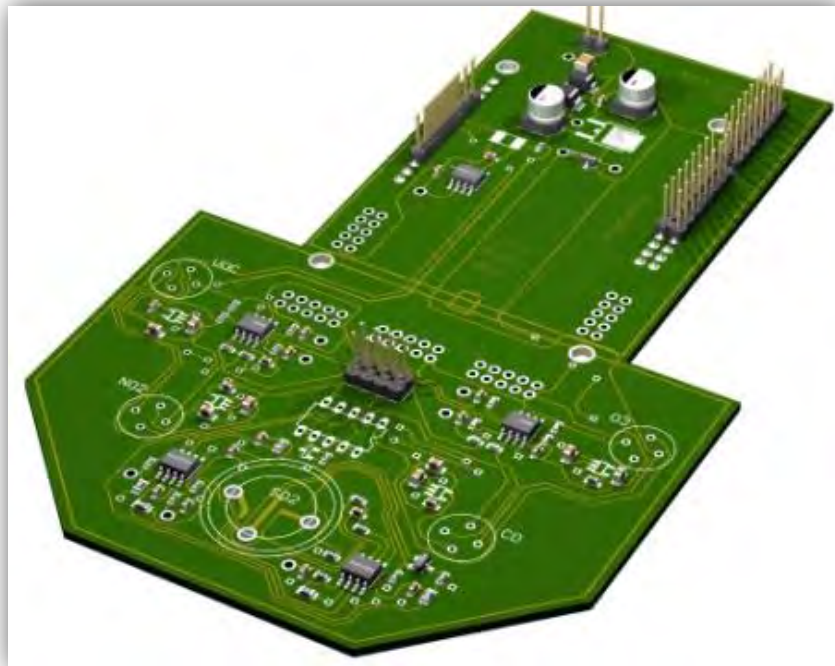
La Figura 37 muestra el diseño electrónico en el software de la tarjeta TEMA. En la parte superior se encuentran los componentes respectivos para las fuentes reguladas, a los costados están los pines de conexión para transferir la información, en la parte inferior se encuentran los *sockets* para cada sensor y todos los elementos correspondientes al acondicionamiento de la señal captada por cada uno de los sensores.

**Figura 37. Esquemático de la tarjeta TEMA en el software**



Una vez desarrollado el diseño en el software la Figura 38 muestra una aproximación de cómo se verá la tarjeta electrónica una vez implementada físicamente.

**Figura 38. Imagen 3D de la tarjeta TEMA en el software**



A continuación se muestra la Figura 39 la cual es una foto de la tarjeta electrónica desarrollada. Esta integra la fuente de alimentación de todo el sistema, con sus respectivos reguladores a las diferentes tensiones que cada módulo requiere, el dispositivo tiene un regulador a 5V, 3.3V y 2.048V. en la parte izquierda de la imagen se encuentran los sensores y la electrónica para acondicionar las señales de cada transductor.

**Figura 39. Foto de la TEMA implementada**

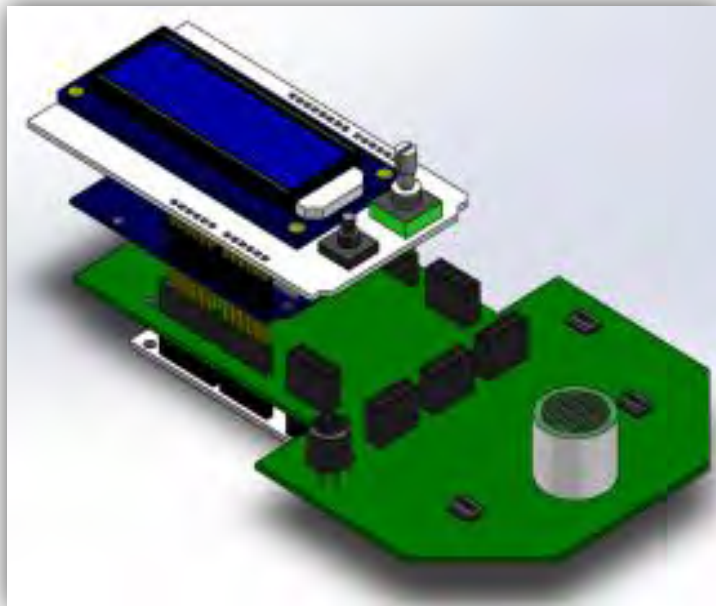


#### **7.4. DESARROLLO DEL MONITOR DE GASES AMBIENTALES**

Según el plan de trabajo del proyecto una vez se implementa la tarjeta electronica para la adquisicion de las señales, se prosigue con el diseño de la integración de los diferentes bloques en un sistema modular, para lo cual se utilizó un software de dibujo asistido por computador.

En la Figura 40 se muestra el diseño del ensamble para el sistema realizado en el software de diseño

**Figura 40. Vistas del ensamble en el software CAD del monitor de gases**



Como se puede observar el sistema tiene un diseño tipo sandwich donde cada nivel contiene una tarjeta electrónica para las diferentes funciones descritas en las parte de diseño. En el primer nivel se encuentra el sistema embebido de señal mixta, en el segundo nivel la tarjeta electrónica para el monitoreo ambiental (TEMA), en el tercer nivel esta el *shield* de arduino para la salida ethernet y el respaldo en memoria sd card y en el último nivel se encuentra la interfaz de usuario que consta de la pantalla LCD con el enconder y joystick.

Figura 41 muestra el sistema monitor de gases ambientales implementado, luego de realizar el ensamble en el software.

**Figura 41. Fotos del monitor de gases ambientales**



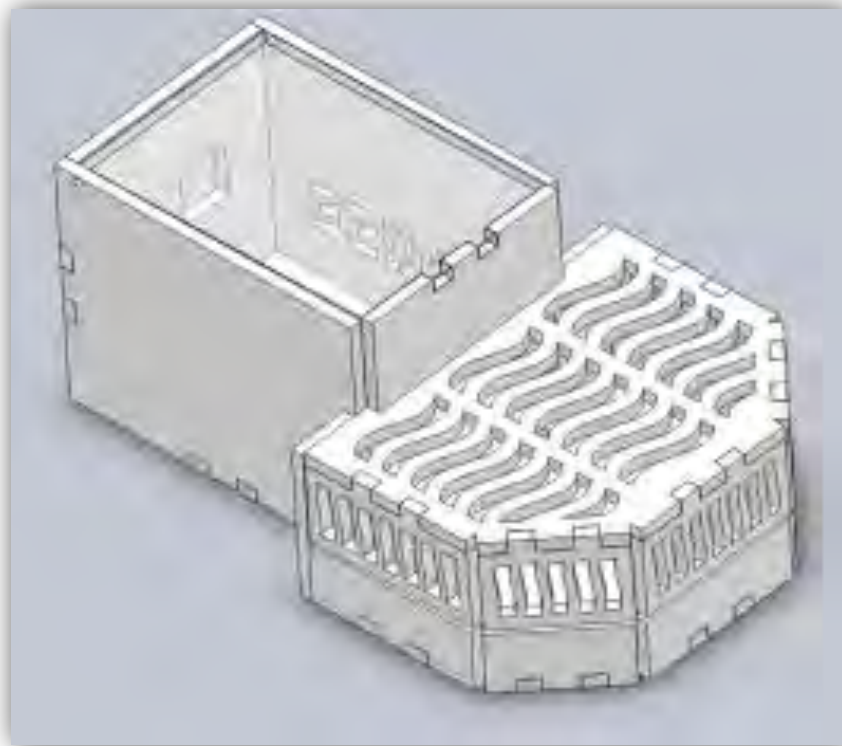
La siguiente fase del proyecto consta en realizar la cubierta para el dispositivo, la cual debe cumplir las funciones de:

- Proteger el dispositivo desarrollado.
- Comodidad para que el usuario pueda transportarlo.
- Tener fácil acceso a los sensores y componentes removibles.
- Tener ventanillas para el flujo de gases dentro del dispositivo.

La Figura 42 muestra el diseño de la cubierta para el dispositivo realizado en el software CAD, como se puede observar conserva la misma forma del dispositivo, en la parte posterior se realiza un agujero para la entrada del conector RJ 45 de ethernet, la parte superior es sujeta por dos pasadores a cada extremo lateral de la parte superior, los pasadores estan insertados en las caras laterales de la cubierta, de esta forma la parte superior puede oscilar de arriba abajo para tener fácil acceso a los sensores y a la tarjeta de memoria *micro-SD*.

Ademas, la parte donde se encuentran los sensores dentro del dispositivo se realizo unas ventanillas en la cubierta que protegera esta parte, con el fin de permitir el flujo de los gases dentro del dispositivo.

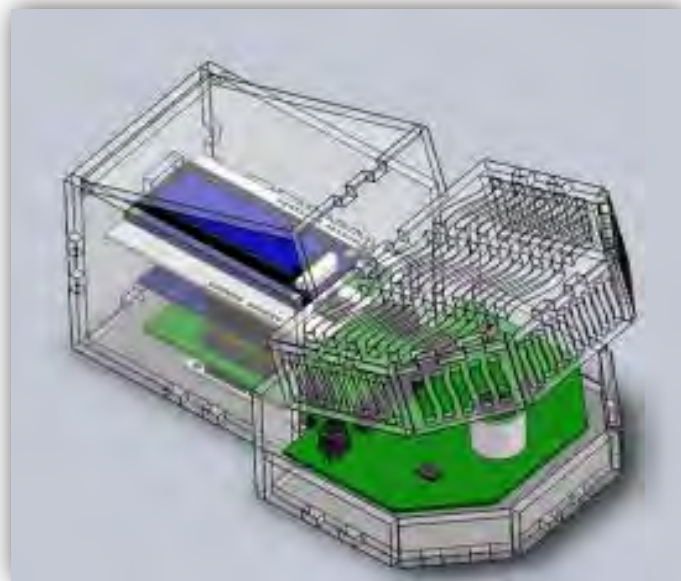
**Figura 42. Diseño en software CAD de la cubierta del dispositivo**



Para verificar que el dispositivo cabe dentro de la cubierta y no existen interferencias entre ellos, se realizó el ensamble en el software de diseño con las medidas reales, la Figura 43 muestra una vista preliminar de como se verá el dispositivo dentro de la cubierta una vez se lleve a cabo la realización.



**Figura 43. Monitor de gases dentro de su cubierta en el software CAD**



Para la implementacion de la cubierta se utilizó la cortadora laser del laboratorio Fablab de la Universidad Autonoma de Occidente, el material utilizado fue acrilico de 4mm de espesor, la Figura 44 muestra la cubierta ensamblada.

**Figura 44. Implementación del *Housing***



Para culminar con la parte de la implementación del dispositivo se realiza la integración de todas las piezas y se ponen dentro de la cubierta, la Figura 45 muestra algunas imágenes del dispositivo terminado.

**Figura 45. Prototipo ensamblado**

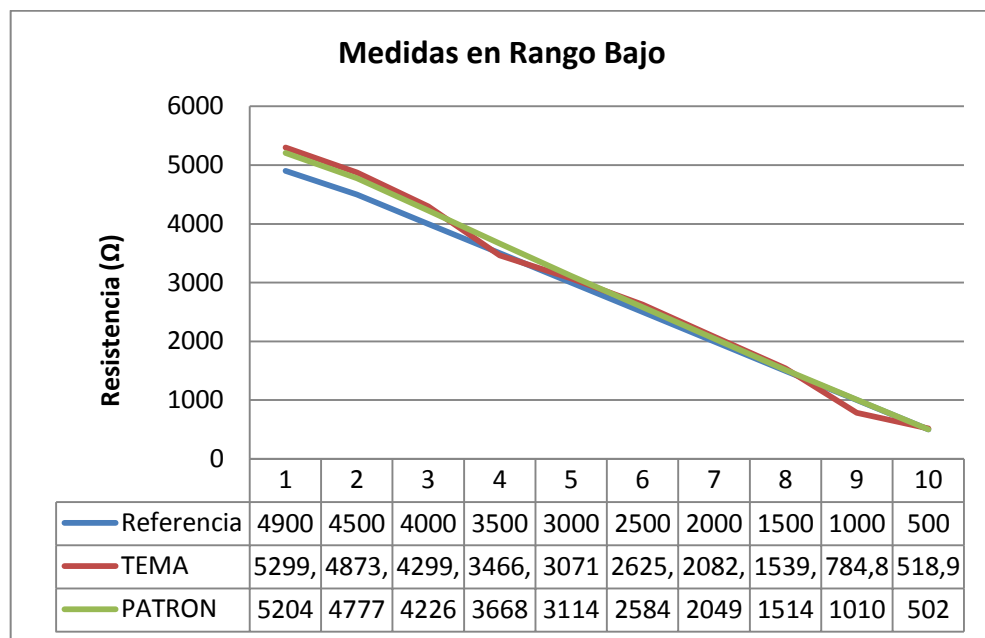


Para probar el circuito de acondicionamiento de los sensores MOS, se realizó el siguiente experimento, se tomó una resistencia de valor conocido y se midió con un multímetro, luego se puso esta resistencia dentro de la TEMA en lugar del sensor para obtener el valor dado por el monitor, siguiente a esto se utilizó el elemento patrón, (kit de evaluación de sensores desarrollado por la compañía *SGX sensortech* con el objetivo de realizar los ajustes o calibraciones respectivas a los circuitos acondicionamiento desarrollados) en el cual se pone la misma resistencia y se obtiene el valor de este dispositivo.

Con estas tres medidas (multímetro, TEMA y patrón) se realizan varias pruebas a diferentes valores de resistencia, posteriormente se grafican para visualizar el

comportamiento del monitor con respecto al patrón y la referencia. La Figura 46 muestra la gráfica en rango bajo para la medición de la tema.

**Figura 46. Medidas de comparación en rango bajo de los sensores MOS**

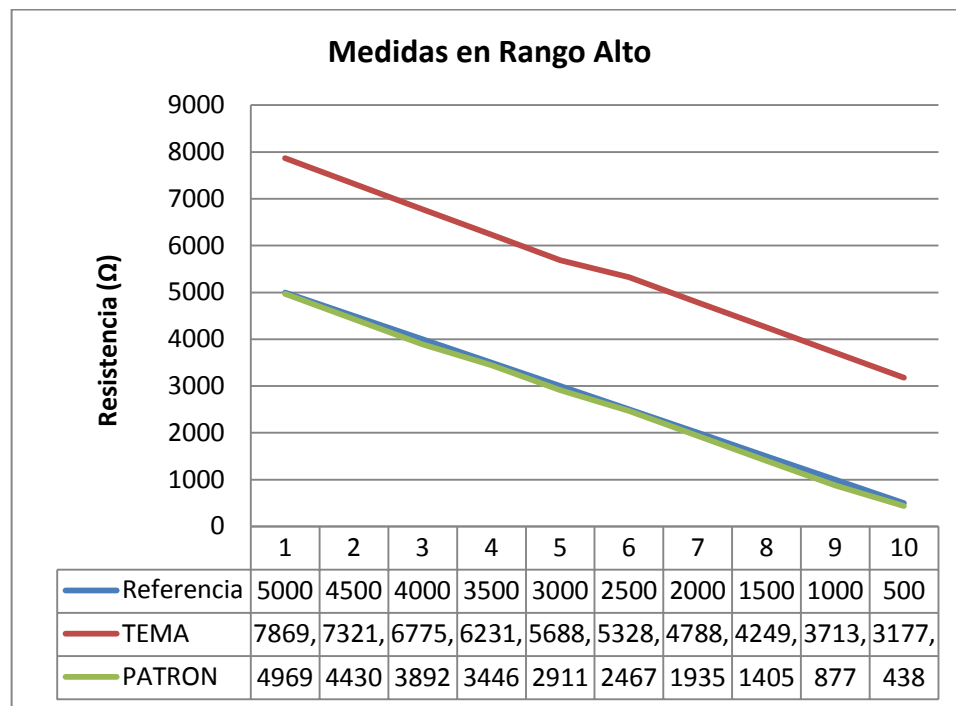


Como se puede observar en la figura TEMA sigue a la referencia y al elemento patrón, lo cual muestra un buen comportamiento en la medidas del monitor y su confiabilidad en la electrónica implementada para el acondicionamiento de las señales.

La Figura 47 muestra la gráfica en el rango alto para la medición de la TEMA, como se puede observar TEMA sigue al elemento patrón y la referencia en su comportamiento, sin embargo tiene un desfase en su curva de valores, este

desfase es de un valor conocido que puede ser ajustado por medio de software para mejorar las precisión del elemento.

**Figura 47. Medidas de comparación en rango bajo de los sensores MOS**



## 8. CONCLUSIONES

El desarrollar el diseño y la implementación de una monitor de gases ambientales con sensores de tecnología semiconductor MOS y electroquímicos propone un cambio tecnológico en cuanto a los estudios de gases ambientales, debido a que estos nuevos dispositivos tendrán menor tamaño, bajo costo y no se necesita de personal muy capacitado ni instrumentos altamente sofisticados para su uso, sin embargo este proyecto solo es el comienzo, requiere de más pruebas, ajustes y comparación de medidas con los estudios tradicionales para verificar su confiabilidad, no obstante las medidas obtenidas con respecto al elemento patrón muestran que no son erradas y que el dispositivo va por buen camino.

El diseño modular que se llevó a cabo en el proyecto facilita el mantenimiento del monitor de gases ambientales y plantea el desarrollo de próximos diseños con mejoras que permitan cada vez llegar a ser más confiables y exactos, tanto como los estudios de gases tradicionales.

Con este proyecto se quiere contribuir con una innovación tecnológica desarrollada en la Universidad Autónoma de Occidente que fomente la construcción de herramientas para el medio ambiente, siendo este proyecto un primer prototipo del cual se pueda ir evolucionando en el campo de la investigación y el desarrollo para próximas generaciones que deseen participar en el ámbito de la implementación de monitores de gases ambientales, que puedan tomar los diseños y el prototipo aquí presentado como base para realizar mejoras o rediseños con el fin de favorecer la tecnología para el cuidado del medio ambiente.

El trabajo a futuro va encaminado a realizar las pruebas correspondientes al comportamiento de los sensores en presencia de diferentes concentraciones de los gases seleccionados, utilizando aire comprimido dentro de un recipiente hermético donde se conozcan las concentraciones de los gases respectivos, registrar los datos tomados por el dispositivo y el elemento patrón para llevar a cabo pruebas de exactitud, linealidad, precisión, repetitividad y reproducibilidad. Para posteriormente realizar los ajustes o calibraciones del dispositivo respectivas. Además probar la funcionalidad en campo del envío de datos a través de Ethernet y el respaldo de los registros en la memoria micro-SD.

## BIBLIOGRAFÍA

AHMADI, M. y JULLIEN, G. Current Mirror Based Potentiostats for Three Electrode Amperometric Electrochemical Sensors. En: IEEE Circuit and Systems Society. 2009.

ALLEN, E. y SÁNCHEZ, E. Switched Capacitor Circuits. Van Nostrand Reinhold company Inc, 1984.

CABRERA, John Jairo. Diseño de un Microsistema para el Procesamiento de Ondas. - Santiago de Cali: [s.n.], 2009.

CABRERA, John y VELASCO, Medina. Diseño de Filtros Analógicos para Alta frecuencia Usando PSoC o FPAAs. - Mexico : IBERCHIP XIV, 2008.

GONZÁLEZ, Ivan, GONZÁLEZ Juan y GOMEZ, Francisco. Hardware Libre: Clasificación y Desarrollo de Hardware Reconfigurable en Entornos GNU/Linux. - Madrid : [s.n.], 2003.

GUTIERREZ, M. y DROGUET, M. La Cromatografía de Gases y la Espectrometría de Masas: Identificación de Compuestos Causantes de Mal Olor. - Catalunya : Boletín Intexter UPC. 2002.

KATULSKI, R. Mobile Monitoring System for Gaseous Air Pollution. En: Metrology and Measurement Systems. 2009. - págs. 677-682.

MARSH, D. Programmable Analogue ICs Challenge Spice and Breadboard Design. En: EDN Europa. 2001.

NOHMI, Takashi. Detection of Carbon Dioxide in Urban Search and Rescue as an Application for Miniaturized Mass Spectrometers [en línea]. Tokio: Mass Spectrom, 2003.

PRIMO, Eduardo. Química Orgánica Básica y Aplicada. Ed. Barcelona : Reverté, 1995. P. 797-807.

WARDENCKI, Waldemar. The estate of art in the field of Non-Stationary instruments for the determination and monitoring of atmospheric pollutants [en línea]. Gdansk, 2008.

WATANABE, M. Simultaneous Determination of Atmospheric Sulfur and Nitrogen Oxides Using a Battery-Operated Portable Filter Pack Sampler [en línea]. En: Environmental Monitoring, Chiba. 2006. P. 167-173.